



TUGAS AKHIR - RE 141581

STUDI LITERATUR REMEDIASI TANAH TERCEMAR LINDI DI TEMPAT PEMROSESAN AKHIR (TPA) SAMPAH MENGGUNAKAN *MIXED TERRESTRIAL PLANTS*

DEWI RETNO SULISTYONINGRUM
3313100101

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Sarwoko Mangkoedihardjo, MScES

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - RE 141581

**STUDI LITERATUR REMEDIASI TANAH
TERCEMAR LINDI DI TEMPAT PEMROSESAN
AKHIR (TPA) SAMPAH MENGGUNAKAN *MIXED
TERRESTRIAL PLANTS***

**DEWI RETNO SULISTYONINGRUM
3313100101**

**DOSEN PEMBIMBING
Prof. Dr. Ir. Sarwoko Mangkoedihardjo, MScES**

**DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018**



FINAL PROJECT - RE 141581

A REVIEW OF LEACHATE CONTAMINATED SOIL REMEDIATION IN MUNICIPAL SOLID WASTE LANDFILL USING MIXED TERRESTRIAL PLANTS

DEWI RETNO SULISTYONINGRUM
3313100101

SUPERVISOR
Prof. Dr. Ir. Sarwoko Mangkoedihardjo, MScES

DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
Faculty of Civil, Environment, and Geo Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

HALAMAN PENGESAHAN

STUDI LITERATUR REMEDIASI TANAH TERCEMAR LINDI DI TEMPAT PEMROSESAN AKHIR (TPA) SAMPAH MENGGUNAKAN *MIXED TERRESTRIAL PLANTS*

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik
pada

Program Studi S-1 Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

DEWI RETNO SULISTYONINGRUM

NRP. 3313100101

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir


Prof. Dr. Ir. Sarwoko Mangkoedihardjo, MScES

NIP. 19540824 198403 1 001



STUDI LITERATUR REMEDIASI TANAH TERCEMAR LINDI DI TEMPAT PEMROSESAN AKHIR (TPA) SAMPAH MENGUNAKAN *MIXED TERRESTRIAL PLANTS*

Nama Mahasiswa : Dewi Retno Sulistyoningrum
NRP : 3313100101
Jurusan : Teknik Lingkungan
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Sarwoko Mangkoedihardjo,
MSc.ES.

ABSTRAK

Masih adanya penimbunan sampah terbuka menyebabkan terjadinya pencemaran lindi ke tanah maupun air. Perlu dilakukan pengolahan terhadap tanah tercemar lindi sehingga tidak mencemari lingkungan. Salah satu metode pengolahan yang bisa diterapkan adalah fitoremediasi. Fitoremediasi merupakan metode pengolahan menggunakan tumbuhan yang tergolong ramah lingkungan dan juga murah. Namun, kebanyakan pengolahan fitoremediasi yang dilakukan hanya menggunakan satu jenis tumbuhan. Sedangkan di alam tumbuhan tidak mungkin hidup hanya dalam satu jenis saja. Karena itu, perlu dilakukan kajian potensi *mixed terrestrial plants* untuk remediasi tanah tercemar lindi.

Sumber literatur yang digunakan dalam studi literatur ini adalah artikel dan jurnal ilmiah, prosiding, tugas akhir, tesis, disertasi, dan literatur lain yang berhubungan dengan topik yang dibahas. Metode studi literatur yaitu mencari sumber literatur menggunakan kombinasi kata kunci seperti lindi, fitoremediasi, atau TPA, pada website pencarian jurnal seperti Google Scholar dan Scencedirect.

Tanah tercemar lindi mengandung berbagai kontaminan organik dan anorganik yang juga terkandung di dalam lindi. Selain itu, tanah yang tercemar lindi akan mengalami perubahan karakteristik fisik dan kimia. Misalnya pH menurun, konduktivitas hidrolis, kapasitas pertukaran kation, konduktivitas elektrik, dan kesadahan meningkat.

Berbagai jenis tumbuhan dapat digunakan untuk remediasi tanah tercemar lindi, karena kontaminan yang beragam jenisnya.

Jenis rerumputan seperti vetiver dan alfalfa mampu menyerap berbagai kontaminan organik maupun logam berat. Jenis pepohonan seperti jarak pagar dan *Eucalyptus* juga mampu menyerap beberapa kontaminan logam berat. Pemilihan tumbuhan didasarkan oleh beberapa faktor seperti jenis dan konsentrasi kontaminan serta kedalaman pencemaran.

Tanah tercemar lindi dapat mengandung berbagai macam kontaminan. Penggunaan *mixed terrestrial plants* dapat meningkatkan efisiensi *removal*. Dengan penyebaran lindi yang bisa mencapai lebih dari 20 m, penggunaan pepohonan sangat diperlukan untuk menjangkau pencemaran. Penggunaan pepohonan dapat dikombinasikan dengan tumbuhan perdu atau lainnya yang memiliki pertumbuhan yang lebih cepat. Faktor yang perlu dipertimbangkan dalam penggunaan *mixed plants* antara lain jenis kontaminan dan sistem operasional.

Kata kunci: fitoremediasi, lindi, *mixed terrestrial plants*, remediasi tanah, TPA

**A REVIEW OF LEACHATE CONTAMINATED SOIL
REMEDIATION IN MUNICIPAL SOLID WASTE LANDFILL
USING MIXED TERRESTRIAL PLANTS**

Name of Student : Dewi Retno Sulistyoningrum
NRP : 3313100101
Study Programme : Environmental Engineering
Supervisor : Prof. Dr. Ir. Sarwoko Mangkoedihardjo,
MSc.ES.

ABSTRACT

Open dumping is causing leachate contamination to soil and water. Remediation is needed so the soil should not be polluting environment. One of the treatment methods that can be applied is phytoremediation. Phytoremediation is a method of remediation using plants that are considered environmentally friendly and also cheap. However, most of phytoremediation treatments are performed using only one plant species. While in the nature, plant cannot live in one type only. Therefore, it is necessary to study the potential of mixed terrestrial plants to remediate leachate contaminated soil.

The literature sources used in this literature study are scientific articles and journals, proceedings, final assignments, theses, dissertations, and other literature related to the topics covered. The literature study method is to search for literature sources using a combination of keywords such as leachate, phytoremediation, or TPA, on journal search websites such as Google Scholar and Science direct.

Leachate contaminated soil contains a variety of organic and inorganic contaminants that are also contained in leachate. In addition, polluted soil will have a change in physical and chemical characteristics. For example the pH decreases, hydraulic conductivity, cation exchange capacity, electrical conductivity, and hardness increased.

Various types of plants can be used to remediate soil contaminated leachate, due to contaminants of various types. Types of grasses such as vetiver and alfalfa are able to absorb

various organic and heavy metal contaminants. Types of trees such as *Jatropha* and *Eucalyptus* are also able to absorb some heavy metal contaminants. Plant selection is based on several factors such as the type and concentration of contaminants as well as the depth of contamination.

Leachate contaminated soil may contain various contaminants. The use of mixed terrestrial plants can improve removal efficiency. With the spread of leachate that can reach more than 20 m, the use of trees is needed to reach the pollution. The use of trees can be combined with herbaceous or other plants that have faster growth. Factors to consider in the use of mixed plants include the types of contaminants and operational systems.

Keyword(s): phytoremediation, leachate, mixed terrestrial plants, soil remediation, landfill

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT, yang atas limpahan rahmat, taufik, dan hidayah-Nya, penulis mampu membuat laporan tugas akhir berjudul “Studi Literatur Remediasi Tanah Tercemar Lindi di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Sampah menggunakan *Mixed Terrestrial Plants*”.

Terselesainya tugas ini tentunya tak lepas dari dorongan dan uluran tangan berbagai pihak. Oleh karena itu, tak salah kiranya bila penulis mengungkapkan rasa terima kasih dan apresiasi kepada:

- Bapak Prof. Dr. Ir. Sarwoko Mangkoedihardjo, MSc.ES. selaku dosen pembimbing yang selalu memberikan saran, bimbingan, dan dukungan.
- Ayah, ibu, dan kakak yang selalu memberi semangat dan do'a.
- Teman-teman yang selalu memberikan semangat.

Penulis menyadari bahwa laporan ini bukanlah tujuan akhir dari belajar, karena belajar adalah sesuatu yang tidak terbatas. Penulis juga menyadari sepenuhnya bahwa laporan ini masih jauh dari kesempurnaan baik isi, bahasa serta penulisannya. Hal ini disebabkan keterbatasan penulis, sehingga kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi kesempurnaan laporan ini. Semoga laporan ini bisa memberikan manfaat bagi penulis maupun yang membacanya.

Surabaya, Januari 2018

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

ABSTRAK

ABSTRACT

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI.....	iii
DAFTAR TABEL.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Ruang Lingkup	2
1.5 Manfaat	3
BAB 2 METODE STUDI	5
2.1 Kerangka Studi.....	5
2.2 Metode Studi	7
2.2.1 Ide Studi.....	7
2.2.2 Metodologi Studi Literatur	8
2.2.3 Outline	8
BAB 3 HASIL DAN PEMBAHASAN	11
3.1 Teori Lindi.....	11
3.2 Karakteristik Tanah Tercemar Lindi	16
3.3 Teori Fitoremediasi.....	18
3.3.1 Fitostabilisasi	23
3.3.2 Fitoekstraksi.....	24
3.3.3 Fitodegradasi	26

3.3.4 Fitovolatilisasi	26
3.3.5 Rizofiltrasi	27
3.3.6 Rizodegradasi.....	27
3.4 Kelompok jenis tumbuhan <i>terrestrial</i> untuk remediasi tanah tercemar lindi.....	28
3.5 Kajian potensi aplikasi <i>mixed plants</i> untuk remediasi tanah tercemar lindi.....	42
3.5.1 <i>Athyrium yokoscense</i> dan <i>Arabis flagellosa</i>	42
3.5.2 <i>Brassica campestris</i> dan <i>Medicago sativa</i>	44
3.5.3 <i>Brassica campestris</i> , <i>Medicago sativa</i> , dan <i>Trifolium repens</i>	45
3.5.4 <i>Sedum alfredii</i> dengan <i>Lolium perenne</i> atau <i>Ricinus communis</i>	46
3.5.5 <i>Medicago sativa</i> L. dengan <i>Festuca arundinacea</i>	46
3.5.6 Penggunaan <i>Mixed Plants</i> pada Remediasi Tanah Tercemar Lindi TPA	47
BAB 4 STUDI KASUS	53
4.1 Studi Kasus	53
4.2 Kajian Tumbuhan untuk Studi Kasus	59
BAB 5 PENUTUP	71
5.1 Kesimpulan.....	71
5.2 Saran	71
DAFTAR PUSTAKA	73
BIOGRAFI PENULIS	89

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Baku Mutu Lindi	11
Tabel 3.2 Rentang Konsentrasi Lindi	12
Tabel 3.3 Karakteristik Lindi Berdasarkan Usia TPA	13
Tabel 3.4 Konsentrasi Lindi di Beberapa TPA di Indonesia	14
Tabel 3.5 Karakteristik Tanah di Greater Visakhapatnam, India	17
Tabel 3.6 Jenis dan Proses Fitoremediasi	18
Tabel 3.7 Kelebihan Berbagai Jenis Fitoremediasi	21
Tabel 3.8 Kelebihan dan Kekurangan Fitoremediasi	22
Tabel 3.9 Jenis-jenis Tumbuhan untuk Kontaminan Organik dan Anorganik	32
Tabel 3.10 Nilai Ambang Logam Berat dalam Tanah	35
Tabel 3.11 Tumbuhan untuk Remediasi Tanah Tercemar Lindi	40
Tabel 3.12 Efisiensi Remediasi PAHs menggunakan <i>Brassica</i> <i>campestris</i> dan <i>Medicago sativa</i>	45
Tabel 3.13 Efisiensi Remediasi PAHs menggunakan <i>Brassica</i> <i>campestris</i> , <i>Medicago sativa</i> dan <i>Trifolium repens</i> ..	45
Tabel 3.14 Penyisihan PCB oleh <i>Medicago sativa L.</i> dan <i>Festuca arundinacea</i>	46
Tabel 4.1 Kualitas Lindi TPA Jatibarang	59
Tabel 4.2 Perbandingan Konsentrasi Logam Berat di tanah TPA Jatibarang	60

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Kerangka Studi	7
Gambar 3.1 Skema Proses Fitoremediasi	20
Gambar 3.2 Proses Fitostabilisasi	24
Gambar 3.3 Skema Proses Fitoekstraksi	25
Gambar 3.4 <i>Poplar</i>	37
Gambar 3.5 <i>Athyrium yokoscense</i>	43
Gambar 3.6 <i>Arabis flagellosa</i>	44
Gambar 3.7 Skema sistem <i>rhizobox</i>	44
Gambar 4.1 Penampang Resistivitas Tanah TPA Jatibarang lintasan 1	54
Gambar 4.2 Penampang Resistivitas Tanah TPA Jatibarang lintasan 2	55
Gambar 4.3 Penampang Resistivitas Tanah TPA Jatibarang lintasan 3	56
Gambar 4.4 Peta Lokasi TPA Jatibarang	57
Gambar 4.5 Vetiver	63
Gambar 4.6 Jarak Pagar	63
Gambar 4.7 <i>Eucalyptus</i>	64
Gambar 4.8 Rencana Remediasi pada Lintasan 1	66
Gambar 4.9 Rencana Remediasi pada Lintasan 2	67
Gambar 4.10 Rencana Remediasi pada Lintasan 3	68
Gambar 4.11 Peta Lokasi Remediasi TPA Jatibarang	69

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Landfill merupakan sistem pengolahan yang paling banyak digunakan di negara berkembang (Guan dkk., 2014). Begitu pula dengan pengolahan sampah domestik di Indonesia yang cenderung masih menggunakan sistem *landfill*. Hal ini disebabkan oleh ketersediaan lahan yang masih luas, karakteristik sampah yang cenderung basah, dan komposisi sampah yang didominasi oleh sisa makanan. Pengolahan menggunakan teknologi seperti *incinerator* tergolong relatif mahal.

Air lindi kaya akan kandungan bahan organik, anorganik, dan mikroorganisme. Air lindi juga mengandung logam berat yang berbahaya bagi lingkungan (Raisi dkk., 2014). Apabila tidak diolah sebelum dibuang maka dapat mencemari tanah dan air tanah. Pengaruh lindi terhadap tanah masih belum diketahui secara pasti (Ali, 2011).

Indonesia merupakan negara tropis dengan curah hujan yang tinggi. Terdapat 460 Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) dengan sistem penimbunan terbuka (Darwati, 2009). Sistem penimbunan terbuka memungkinkan terjadinya infiltrasi ke dalam *landfill* dan menyebabkan peningkatan volume air lindi yang dihasilkan. Apabila sistem *layer* dan penyaluran lindi tidak berfungsi dengan baik, dapat terjadi pencemaran lindi ke tanah maupun air.

Menurut Ali (2011), sebuah hasil penelitian menginformasikan bahwa dengan memanfaatkan kandungan nitrogen (N) dan kalium (K) pada air lindi sebagai pupuk, karena air lindi dapat dinetralkan oleh tanah dan berfungsi sebagai unsur hara tumbuhan. Meskipun begitu, air lindi mengandung logam berat yang cukup tinggi sehingga dapat menjadi toksik bagi tumbuhan.

Oleh karenanya, perlu dilakukan pengolahan terhadap tanah tercemar lindi. Sehingga tidak mencemari lingkungan (air tanah maupun tumbuhan). Ada banyak teknik remediasi tanah tercemar, namun karena biaya, waktu, dan ketersediaan alat

hanya sedikit yang bisa diterapkan. Fitoremediasi setidaknya 50% lebih murah, bahkan lebih murah dibandingkan dengan bioremediasi (Vangronveld dkk., 2009). *Terrestrial plants* berpotensi lebih efektif untuk digunakan untuk fitoremediasi dibandingkan dengan *aquatic plants* karena sistem perakarannya (Pivetz, 2001).

Hampir semua fitoremediasi menggunakan satu jenis tumbuhan. Sedangkan di alam, tumbuhan yang hidup pasti bercampur jenisnya (Somtrakoon dan Kruatrachue, 2014). Karena itu, perlu dilakukan kajian potensi *mixed terrestrial plants* untuk remediasi tanah tercemar lindi.

Dalam studi literatur yang akan dilakukan, penulis akan mencoba mengkaji lebih dalam potensi *mixed terrestrial plants* untuk remediasi tanah tercemar lindi. Melalui studi literatur ini, diharapkan dapat memberikan alternatif baru dalam remediasi tanah tercemar lindi.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam studi literatur ini adalah:

1. Perlunya kajian kelompok jenis tumbuhan untuk remediasi tanah tercemar lindi
2. Perlunya kajian potensi *mixed terrestrial plants* untuk remediasi tanah tercemar lindi.

1.3 Tujuan

Tujuan dari studi literatur ini adalah sebagai berikut:

1. Mengkaji kelompok jenis tumbuhan yang dapat digunakan untuk remediasi tanah tercemar lindi.
2. Mengkaji potensi *mixed terrestrial plants* untuk remediasi tanah tercemar lindi tempat pemrosesan akhir (TPA) sampah.

1.4 Ruang Lingkup

Ruang lingkup dari studi literatur ini adalah sebagai berikut:

1. Pembahasan tumbuhan mencakup jenis tumbuhan dan potensi tumbuhan dalam meremediasi tanah tercemar lindi TPA.

2. Contoh studi kasus diambil dari kasus di Indonesia untuk mengaplikasikan kajian remediasi tanah tercemar lindi TPA dengan *mixed terrestrial plants*.
3. Jenis tumbuhan yang dibahas diutamakan yang tersedia di negara tropis, apabila tidak mencukupi maka diperluas hingga sub tropis.

1.5 Manfaat

Manfaat dari studi literatur ini adalah sebagai berikut:

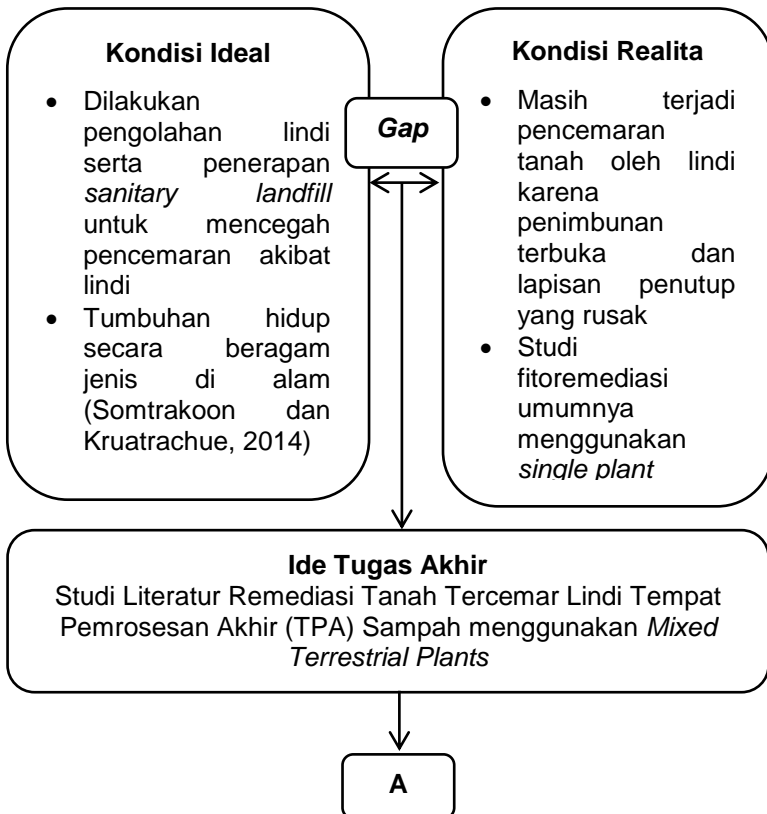
1. Memberikan informasi tumbuhan yang berpotensi untuk remediasi tanah tercemar lindi TPA dan alternatif dalam remediasi tanah tercemar lindi.

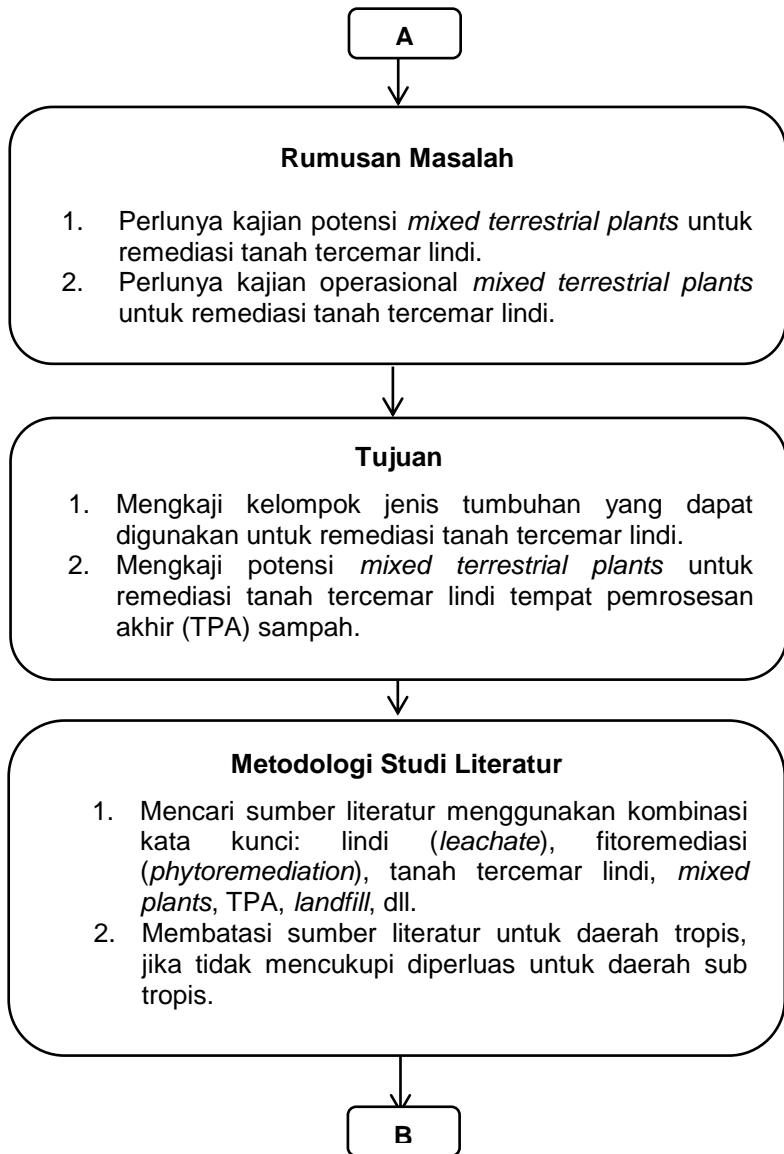
Halaman ini sengaja dikosongkan

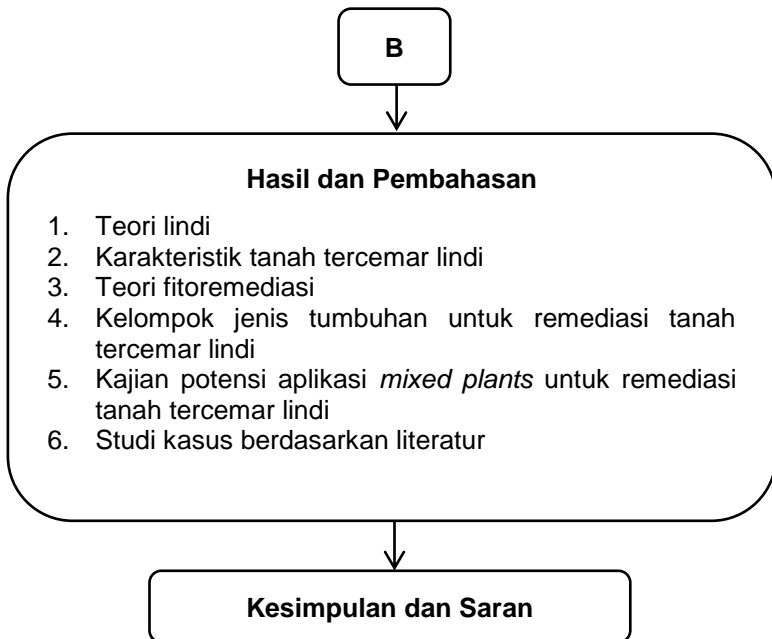
BAB 2 METODE STUDI

2.1 Kerangka Studi

Kerangka studi (Gambar 2.1) merupakan dasar-dasar pemikiran untuk mencapai tujuan studi. Tujuan dibuatnya kerangka studi adalah sebagai acuan proses pengambilan literatur, sehingga proses penulisan dapat berjalan secara sistematis.







Gambar 2.1 Kerangka Studi

2.2 Metode Studi

Metode studi berisi rangkaian langkah studi yang akan dilakukan hingga mendapatkan kesimpulan. Metode studi dibuat agar pelaksanaan studi terarah dan dapat mencapai tujuan.

2.2.1 Ide Studi

Ide studi didapatkan setelah melakukan *gap analysis* dengan membandingkan kondisi di lapangan dan kondisi ideal. Ide studi berasal dari masalah akibat perbedaan kondisi keduanya. Perbedaan yang mendasari studi literatur ini adalah:

1. Terjadinya pencemaran tanah akibat penimbunan terbuka dan sistem *layer* yang tidak sesuai standar atau rusak. Contohnya yaitu TPA Dago Bandung yang ditutup

operasinya pada tahun 1990 akibat mencemari tanah dengan logam berat tembaga (Cu), nikel (Ni), dan seng (Zn) (Darmayanti dkk., 2011).

2. Studi fitoremediasi yang umumnya hanya menggunakan *single plant*. Sedangkan di alam, tumbuhan yang hidup pasti bercampur jenisnya (Somtrakoon dan Kruatrachue, 2014). Karena itulah perlu kajian mengenai aplikasi *mixed plants* untuk remediasi.

2.2.2 Metodologi Studi Literatur

Studi literatur bertujuan untuk mendukung dan meningkatkan pemahaman terhadap ide penelitian. Sumber literatur yang digunakan adalah:

1. artikel dan jurnal ilmiah,
2. *proceeding*,
3. tugas akhir,
4. tesis, dan
5. disertasi

yang berhubungan dengan topik yang dibahas. Buku ajar ataupun buku referensi digunakan apabila jumlah literatur yang didapat belum mencukupi. Jumlah literatur yang digunakan berjumlah minimal 100 yang berasal dari Indonesia maupun luar negeri.

Sumber literatur didapatkan dari Google Scholar, Sciencedirect, berbagai website pencarian jurnal dan buku lain, serta perpustakaan. Metodologi studi literatur yang dilakukan dengan:

1. Mencari sumber literatur menggunakan kombinasi kata kunci: lindi (*leachate*), fitoremediasi (*phytoremediation*), tanah tercemar lindi, *mixed plants*, TPA, *landfill*, dll.
2. Membatasi sumber literatur untuk daerah tropis, jika tidak mencukupi diperluas untuk daerah sub tropis.

2.2.3 Outline

Berikut adalah *outline* dari laporan tugas akhir yang akan dibuat:

Bab 1 Pendahuluan

- 1.1 Latar belakang
- 1.2 Rumusan masalah

- 1.3 Tujuan
- 1.4 Ruang lingkup
- 1.5 Manfaat
- Bab 2 Metode Studi
 - 2.1 Kerangka studi
 - 2.2 Metode studi
 - 2.2.1 Ide studi
 - 2.2.2 Metodologi studi literatur
 - 2.2.3 Outline
- Bab 3 Hasil dan Pembahasan
 - 3.1 Teori lindi

Sub bab ini berisi tentang definisi lindi, pembentukan lindi, karakteristik lindi TPA, dan baku mutu lindi sesuai Lampiran I Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 59 tahun 2016 tentang Baku Mutu Lindi bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah.
 - 3.2 Karakteristik tanah tercemar lindi

Sebagai indikasi bahwa tanah tidak lagi tercemar adalah adanya respirasi serta tanah tersebut dapat digunakan kembali sesuai fungsinya.
 - 3.3 Teori fitoremediasi

Sub bab ini berisi tentang definisi, proses, serta keunggulan fitoremediasi.
 - 3.4 Kelompok jenis tumbuhan *terrestrial* untuk remediasi tanah tercemar lindi

Dari berbagai literatur mengenai karakteristik tanah tercemar lindi dan persebaran lindi, maka dikaji kelompok jenis tumbuhan yang cocok untuk remediasi tanah tercemar lindi.
 - 3.5 Kajian potensi aplikasi *mixed plants* untuk remediasi tanah tercemar lindi

Kajian ini dilakukan berdasarkan literatur mengenai penggunaan *mixed plants* dalam fitoremediasi. Kelompok jenis tumbuhan yang digunakan adalah yang telah dikaji pada pembahasan kelompok jenis tumbuhan untuk remediasi tanah tercemar lindi.
- Bab 4 Studi Kasus
 - 4.1 Studi kasus
 - 4.2 Kajian tumbuhan dalam studi kasus

Sub bab ini berisi tentang kajian tumbuhan dalam studi kasus seperti mekanisme fitoremediasi oleh tumbuhan tersebut, siklus hidup, dll.

Bab 5 Penutup

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan merupakan jawaban dari studi literatur yang didapatkan dari hasil dan pembahasan.

5.2 Saran

Saran berisi hal-hal yang masih dapat dikerjakan dengan baik dan dikembangkan lebih lanjut.

BAB 3

HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Teori Lindi

Menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 59 tahun 2016 tentang Baku Mutu Lindi bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah, lindi adalah cairan yang timbul akibat masuknya air eksternal ke dalam timbunan sampah, melarutkan dan membilas materi-materi terlarut, termasuk materi organik hasil proses dekomposisi secara biologis. Kuantitas lindi yang dihasilkan bergantung pada banyaknya air yang masuk dari luar dan aspek operasional seperti tanah penutup, kemiringan permukaan, kondisi iklim, dan sebagainya (Darmayanti dkk., 2011).

Lindi TPA mengandung kontaminan organik dan anorganik dalam jumlah yang besar. Lindi juga mungkin memiliki konsentrasi logam yang tinggi dan mengandung bahan kimia organik yang berbahaya. Umumnya, lindi memiliki konsentrasi *chemical oxygen demand* (COD), pH, amonia nitrogen, logam berat, serta warna yang pekat dan bau tidak sedap. Karakteristik lindi bervariasi bergantung pada komposisi, volume, dan bahan *biodegradable* yang ada (Raghab dkk., 2013).

Tabel 3.1 Baku Mutu Lindi

Parameter	Kadar Paling Tinggi	
	Nilai	Satuan
pH	6 – 9	-
BOD	150	mg/l
COD	300	mg/l
TSS	100	mg/l
N total	60	mg/l
Merkuri	0,005	mg/l
Kadmium	0,1	mg/l

Sumber: Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 59 tahun 2016

Selain itu, lindi juga mengandung polutan mikro organik yang beracun, karsinogenik, dan bahkan bisa mengalami mutasi seperti *polycyclic aromatic hydrocarbons* (PAHs), pestisida, dan fenol. Jumlah mikro polutan ini lebih kecil jika dibandingkan dengan komponen total organik seperti *biochemical oxygen demand* (BOD), COD, atau *total organic carbon* (TOC) (Yiping dkk., 2008).

Tabel 3.2 Rentang Konsentrasi Lindi

Parameter	Konsentrasi	Satuan
pH	4,5 – 9,0	-
Konduktivitas spesifik	2.500 – 35.000	μS/cm
<i>Total solids</i>	2.000 – 60.000	mg/l
TOC	30 – 29.000	mg/l
BOD ₅	20 – 57.000	mg/l
COD	140 – 152.000	mg/l
BOD ₅ /COD	0,02 – 0,8	mg/l
Nitrogen organik	14 – 2.500	mg/l
Total fosfor	0,1 – 23	mg/l
Klorida	150 – 4.500	mg/l
Sulfat	8 – 7.720	mg/l
Hidrogen bikarbonat	610 – 7.320	mg/l
Sodium	70 – 7.700	mg/l
Potasium	50 – 3.700	mg/l
Amonium	50 – 2.200	mg/l
Kalsium (Ca)	10 – 7.200	mg/l
Magnesium (Mg)	30 – 15.000	mg/l
Besi (Fe)	3 – 5.500	mg/l
Mangan (Mn)	0,03 – 1.400	mg/l
Silika (Si)	4,7	mg/l
Kadmium (Cd)	0,0001 – 0,4	mg/l
Kromium (Cr)	0,02 – 1,5	mg/l
Kobalt (Co)	0,005 – 1,5	mg/l
Tembaga (Cu)	0,005 – 10	mg/l
Timah (Pb)	0,001 – 5	mg/l
Merkuri (Hg)	0,00005 – 0,16	mg/l
Nikel (Ni)	0,015 – 13	mg/l
Zink (Zn)	0,03 – 1.000	mg/l

Sumber: Kjeldsen dkk., 2002

Adanya perbedaan konsentrasi parameter karakteristik lindi berdasarkan usia TPA disebabkan oleh fase proses yang terjadi. Fase-fase ini terjadi akibat adanya proses degradasi pada sampah. Pada fase pertama merupakan fase aerobik, dimana ada oksigen yang terperangkap pada saat penimbunan sampah dan infiltrasi air hujan. Pada fase ini terjadi degradasi zat organik yang menghasilkan karbon dioksida dan air. Ini mendorong terjadinya fermentasi asetonik, menghasilkan lindi dengan konsentrasi BOD, COD, dan nitrogen amonia yang tinggi. *Volatile fatty acids* (VFA) yang merupakan komponen utama senyawa organik akan dilepaskan.

Perlahan, oksigen akan habis dan akan terjadi fase anaerobik. Pada fase anaerobik, dimulai proses dekomposisi dan senyawa organik sederhana yang dihasilkan dari proses asetonik akan digunakan dan dihasilkan gas TPA. Pada fase ini, komposisi lindi menggambarkan dinamika mekanisme oleh mikroorganisme dimana konsentrasi BOD dan COD rendah sedangkan amonia tetap tinggi. Senyawa anorganik terlarut terus dihasilkan. Dengan umur TPA yang semakin tua, proses degradasi selesai dan semua zat organik telah diproses dan terjadi stabilisasi sampah. VFA dan rasio BOD/COD akan turun. Durasi fase-fase ini bervariasi tergantung beberapa faktor seperti kondisi lingkungan, karakteristik sampah, faktor operasional, dll (George, 2014). Karakteristik lindi berdasarkan usia TPA dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Karakteristik Lindi Berdasarkan Usia TPA

Karakteristik	Muda	Sedang	Tua
Umur (tahun)	<5	5 – 10	>10
pH	<6,5	6,5 – 7,5	>7,5
COD (mg/l)	>10000	4000 – 10000	<4000
BOD ₅ /COD	0,5 – 1,0	0,1 – 0,5	<0,1
Senyawa organik	80% VFA	5-30% VFA + <i>Humic & fumic</i>	<i>Humic & fumic</i>
Nitrogen amonia (mg/l)	<400	-	>400
TOC/COD	<0,3	0,3 – 0,5	>0,5
Kjeldahl	0,1 – 0,2	-	-

Karakteristik	Muda	Sedang	Tua
nitrogen (g/l)			
Logam berat	Rendah – sedang	Rendah	Rendah
Biodegradabilitas	Penting	Sedang	Rendah

Sumber: Wei dkk., 2010

Pada Tabel 3.4 menunjukkan konsentrasi lindi di beberapa TPA di Indonesia. Semua nilai konsentrasi parameter masuk ke dalam rentang konsentrasi lindi pada Tabel 3.2. Ketiga TPA memiliki konsentrasi BOD dan COD sangat rendah. Berdasarkan Tabel 3.3, maka ketiganya digolongkan memiliki lindi tua.

Tabel 3.4 Konsentrasi Lindi di Beberapa TPA di Indonesia

Parameter	TPA Leuwigajah ¹⁾	TPA Bakung ²⁾	TPA Klotok ³⁾
pH	6,5 – 6,9	8,2	6,84 – 6,955
BOD (mg/l)	11,3 – 14,46	514	115,8–561,5
COD (mg/l)	280,9 – 282,3	1279	440 – 1328

Sumber: 1) Irawan dkk., 2015

2) Usman dan Santosa, 2014

3) Hariyanto dkk., 2014

Lindi terbentuk akibat adanya air yang masuk ke dalam timbunan sampah maupun akibat kandungan air di dalam sampah itu sendiri. Oleh karenanya, pada sistem *sanitary landfill* digunakan penutup di bagian atas dan lapisan pelindung pada bagian bawah. Lapisan pelindung di bagian bawah berguna untuk melindungi tanah dan air tanah dari pencemaran akibat lindi yang dihasilkan. Sedangkan lapisan penutup berfungsi untuk mengurangi infiltrasi yang terjadi pada tumpukan sampah, sehingga mengurangi lindi yang terbentuk.

Bahan yang sering digunakan sebagai lapisan pelindung adalah geomembran. Namun ukuran geomembran terbatas, sedangkan ukuran TPA dengan metode *landfill* biasanya sangat luas. Untuk menutup semua area penimbunan sampah, geomembran harus disambung dengan cara *heat welding*. Setelah proses *heat welding*, lapisan geomembran harus tersambung dengan baik (Guan dkk., 2014). Operasional yang

kurang baik bisa menyebabkan adanya lubang pada sambungan, sehingga menyebabkan adanya lindi yang lolos ke tanah.

Pada *open dumping*, penumpukan sampah tidak diberi lapisan pelindung maupun penutup. Hal ini menyebabkan tingginya tingkat infiltrasi, membuat lindi yang dihasilkan semakin banyak. Tidak adanya lapisan pelindung pada bagian bawah tumpukan sampah akan menyebabkan lindi yang terbentuk masuk ke dalam tanah maupun air tanah.

Untuk bisa meremediasi tanah yang tercemar lindi, perlu diketahui kedalaman pencemaran. Hal ini sangat penting dalam fitoremediasi, karena akar tumbuhan yang digunakan harus mencapai kedalaman pencemaran. Berikut adalah beberapa penelitian mengenai persebaran lindi dalam tanah.

Pada penelitian oleh George (2014) di TPA Kalamaserry, Kerala, India ditemukan konsentrasi kimia relatif tinggi pada tanah di kedalaman 20 m dan kemudian menurun. Hal ini mengindikasikan bahwa tanah pada kedalaman 30 m atau lebih tidak terpengaruh oleh lindi. Pada penelitian oleh Alaydrus (2010) di TPA Kebon Kongok, NTB ditemukan persebaran lindi pada kedalaman 0,8 – 13,5 m dan jarak hingga 410 m dari TPA. Sementara penelitian oleh Hasanah dkk. (2015) di TPA Babakan, Ciparay ditemukan persebaran lindi pada kedalaman 1,25 – 3,75 m.

Zhan dkk. (2014) meneliti persebaran lindi secara vertikal di tanah pada TPA Huainan, Cina. Jenis tanah pada kedalaman 1 – 2 m, 2 – 4 m, 5 – 8 m masing-masing adalah tanah bajak, lapisan tanah liat, dan lapisan tanah liat tua. Pada kedalaman lebih dari 9 m merupakan bebatuan. Persebaran lindi telah mencapai kedalaman lebih dari 9 m sejak 17 tahun operasional TPA. Diperkirakan migrasi klorida hingga kedalaman 3 m, sementara nitrogen pada kedalaman 2 m. Migrasi sodium dan COD pada kedalaman masing-masing 3 – 5 m dan 2 – 3 m. Selain itu, tanah memiliki kemampuan menyerap senyawa organik karena adanya kandungan organik yang tinggi di tanah dengan kedalaman 2 m.

Deswita dkk. (2015) meneliti persebaran lindi di tanah pada TPA Air Dingin, Padang. Jenis batuan penyusun lapisan bawah permukaan bumi terdiri dari tanah liat, *sandstones*, dan *andesit*. Terdapat 3 lintasan yang dibuat untuk menganalisis persebaran lindi, yaitu di dekat tumpukan sampah, dekat kolam penampungan lindi, dan di dekat sungai. Persebaran lindi yang berasal dari tumpukan sampah berada pada jarak berkisar antara 125 – 213,4 m dan kedalaman antara 10 – 15 m. Sedangkan secara keseluruhan, diketahui persebaran lindi berada pada kedalaman berkisar antara 5 – 17,5 m dan jarak berkisar antara 96,5 – 280 m. Selain itu, migrasi lindi di tanah akan mengalir dari tempat yang lebih tinggi ke tempat yang lebih rendah.

Migrasi lindi di tanah tidak hanya dipengaruhi oleh ketinggian. Secara vertikal, jenis tanah dan batuan juga mempengaruhi pergerakan lindi. Tanah liat misalnya, mampu menyerap logam berat sehingga membatasi penyebaran lindi. Dari beberapa penelitian yang telah disebutkan, diketahui penyebaran lindi bisa mencapai kedalaman hingga 20 m dan jarak mencapai 410 m dari lokasi TPA.

3.2 Karakteristik Tanah Tercemar Lindi

TPA dengan metode *landfill* merupakan sumber pencemaran air tanah dan tanah akibat produksi dan migrasi lindi (Bouzayani dkk., 2014). Karena migrasi lindi, tanah menjadi tercemar oleh logam berat. Logam berat dari sampah ini menimbulkan masalah karena tidak dapat didegradasi secara biologis (Kanmani dan Gandhimathi, 2013). Pada penelitian yang dilakukan oleh Schueler dan Mahler (2007) di tempat pembuangan akhir di Brazil, aliran permukaan umum terjadi karena tidak adanya penutup. Adanya aliran lindi pada permukaan ini menyebabkan tingginya konsentrasi kontaminan yang tinggi pada tanah.

Semakin tinggi persentase lindi pada tanah maka akan mempengaruhi karakteristik tanah sebagai berikut: (a) pH tanah menurun; (b) konduktivitas hidrolis meningkat; (c) kesadahan meningkat; dan (d) konsentrasi klorida, sulfat, dan nitrat meningkat (Pillai dkk., 2014). Hal ini sesuai dengan percobaan yang dilakukan oleh Galko (2015) dimana setelah terkontaminasi

oleh lindi, konsentrasi klorida, total kesadahan, dan total alkalinitas meningkat. Secara umum, timbunan sampah menimbulkan dampak pada karakteristik kimia sampah. Selain mengurangi kekuatan tanah, juga menimbulkan pencemaran pada air tanah akibat perkolasi bahan kimia beracun dan berbahaya (Pillai dkk., 2014).

Normalitas pada lindi juga memberikan pengaruh pada tanah. Semakin tinggi konsentrasi lindi, maka pH tanah meningkat. Hal ini mungkin disebabkan oleh tingginya konsentrasi kation monovalen dan divalen pada lindi. Selain itu juga terjadi peningkatan kapasitas pertukaran kation, konduktivitas elektrik (EC), kalsium, sulfat, dan besi (Goswami dan Choudhury, 2013).

Penelitian oleh Praveena dan Rao (2016) di Greater Visakhapatnam, India menunjukkan perubahan karakteristik sampel tanah di dekat TPA dibandingkan dengan kontrol yang diambil jauh dari TPA. Karakteristik tanah di Greater Visakhapatnam, India dapat dilihat pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Karakteristik Tanah di Greater Visakhapatnam, India

Parameter	S1	S2	S3	S4	S5
pH	6,18	7,63	7,84	7,86	8,34
EC (mmhos/cm)	1,24	1,18	1,14	1,09	1,03
Kelembaban (%)	36,04	31,12	28,03	24,02	18,1
Organik karbon (%)	3,04	2,13	2,04	1,42	0,8
Nitrogen (kg/acre)	262	187	144	115	62
P ₂ O kg/acre	91	84	76	73	34
K ₂ O kg/acre	363	235	179	157	15

Keterangan: S1= dekat TPA, S2= jarak 1 km, S3= jarak 2 km, S4= jarak 3 km, S5= sampel kontrol jauh dari TPA.

Sumber: Praveena dan Rao, 2016

Terjadi peningkatan pH seiring bertambahnya jarak lokasi tanah ke TPA. Sebaliknya, terjadi penurunan konduktivitas elektrik,

Kelembaban, organik karbon, nitrogen, P_2O , dan K_2O seiring bertambahnya jarak lokasi tanah ke TPA. Meskipun terjadi peningkatan pH, hal ini juga dipengaruhi oleh tekstur tanah, porositas, dan kapasitas infiltrasi air. Peningkatan pH di tanah yang agak jauh dari TPA sering dijumpai di *landfill* berumur 10 tahun. Konduktivitas elektrik di dekat TPA lebih tinggi. Hal ini dikarenakan peningkatan garam dan ion. Kadar Kelembaban di tanah yang dekat TPA tinggi karena adanya bahan organik yang tinggi dan aktivitas mikroba. Sedangkan kadar nitrogen dan fosfor di tanah TPA mungkin disebabkan oleh tingginya bahan organik.

Dengan tingginya kandungan N, P, dan K pada tanah tercemar lindi, maka fitoremediasi merupakan teknologi yang layak digunakan. Tumbuhan akan menyerap nutrisi yang berlebih pada tanah untuk pertumbuhan. Tanah tercemar lindi juga mengandung logam berat yang bervariasi. Beberapa logam berat (Fe, Mn, Mg, Zn, Cu, dan Mo) merupakan nutrisi yang dibutuhkan oleh tumbuhan. Oleh karena itu, dipilih tumbuhan yang mampu bertahan dan dapat mengakumulasi logam berat untuk meremediasi tanah tercemar lindi.

3.3 Teori Fitoremediasi

Fitoremediasi adalah menghilangkan polutan dari tanah atau perairan yang terkontaminasi menggunakan tumbuhan. Fitoremediasi bisa berupa herba, semak, atau pohon. Namun untuk fitoremediasi, diutamakan menggunakan semak, perdu, atau jenis rerumputan (Juhaeti dkk., 2004). Ada beberapa jenis teknologi fitoremediasi. Jenis dan proses fitoremediasi dapat dilihat pada Tabel 3.6. Sedangkan gambaran beberapa jenis fitoremediasi bisa dilihat pada Gambar 3.1. Teknik fitoremediasi semakin berkembang karena lebih murah dibandingkan teknologi lainnya (Juhaeti dkk., 2004). Kelebihan dari beberapa jenis teknologi fitoremediasi dapat dilihat pada Tabel 3.7.

Tabel 3.6 Jenis dan Proses Fitoremediasi

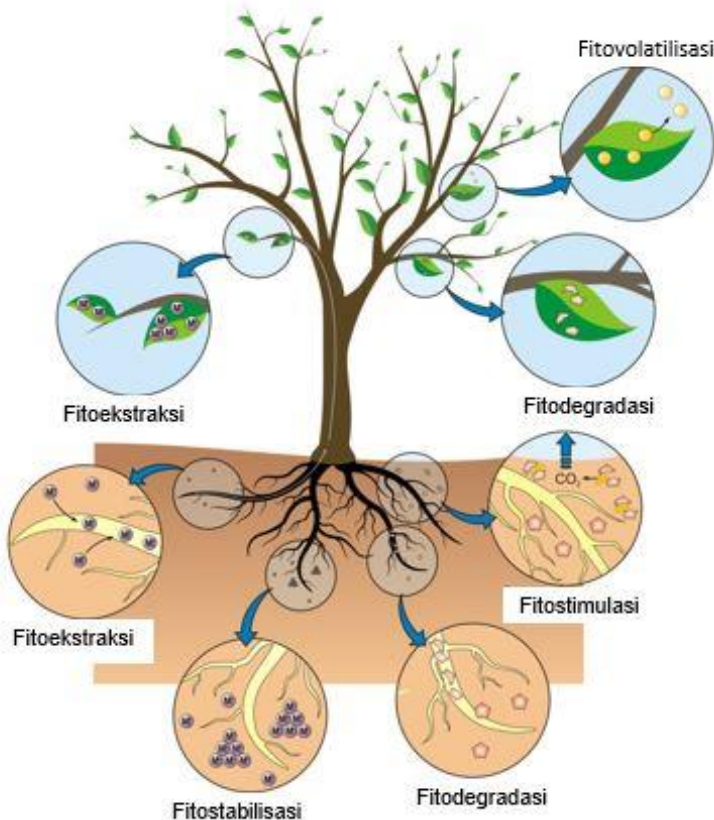
Jenis	Proses
Fitoekstraksi	Hiperakumulator mengekstraksi logam dari tanah dan mengakumulasinya di dalam tunas
Rizofiltrasi	Akar tumbuhan yang hidup di air

Jenis	Proses
	tercemar mengendapkan logam
Fitostabilisasi	Tumbuhan yang toleran terhadap logam berat menstabilisasi logam di dalam tanah
Fitovolatilisasi	Tumbuhan menyerap logam dalam tanah dan menguapkannya
Fitodegradasi	Tumbuhan menyerap kontaminan dan mendegradasinya dari jaringan tumbuhan
<i>Rhizosphere degradation</i>	Tumbuhan mengeluarkan enzim yang dapat mendegradasi polutan secara langsung dan/atau memicu bakteri yang terlibat dalam proses degradasi
Pompa hidrolik	Akar tumbuhan menyerap air dan mencegah persebaran polutan
<i>Phytosorption</i>	Akar dan daun tumbuhan mengadsorpsi polutan dan mencegah pergerakannya
<i>Phytocapping</i>	Tumbuhan mengonsumsi air dari hujan dan mengurangi air yang masuk ke tanah, sehingga mengurangi pergerakan polutan

Sumber: Nagendran, 2006

Adapun proses fitoremediasi yang berlaku pada tanah tercemar lindi adalah fitostabilisasi, fitodegradasi, fitoekstraksi, dan fitovolatilisasi. Tumbuhan akan menyerap banyak air tanah untuk proses transpirasi. Sehingga air tanah akan naik dan kontaminan terbawa dan menurunkan konsentrasi kontaminan di tanah lapisan bawah. Proses ini disebut juga kontrol hidrolik air tanah (Mangkoedihardjo dan Samudro, 2010). Kontaminan yang berada di dekat zona akar kemudian akan mengalami fitostabilisasi dan rizodegradasi. Tumbuhan akan mengeluarkan eksudat yang akan menstimulasi bakteri dan proses biokimia dari pembentukan mineral logam. Hal ini akan menyebabkan kontaminan terakumulasi di zona akar. Sedangkan kontaminan organik yang mudah terurai mudah terurai yang dapat terukur sebagai BOD dan kontaminan anorganik seperti amonium, nitrit, dan logam berat akan terdegrasi dalam proses rizodegradasi.

Kontaminan juga akan diserap oleh tumbuhan. Logam maupun kontaminan yang terserap akan disimpan di jaringan tumbuhan (fitoekstraksi). Kontaminan organik seperti pelarut teroklorinasi, herbisida, insektisida, dan nutrisi anorganik akan digunakan tumbuhan dalam proses metabolisme (fitodegradasi). Sedangkan kontaminan yang bisa menguap seperti pelarut teroklorinasi TCE dan MTBE akan diuapkan oleh tumbuhan melalui proses fitovolatilisasi.



Gambar 3.1 Skema Proses Fitoremediasi
Sumber: Favas dkk., 2014

Tabel 3.7 Kelebihan Berbagai Jenis Fitoremediasi

Jenis	Kelebihan
Fitostabilisasi	Tidak perlu memindahkan tanah, tidak membutuhkan pembuangan limbah berbahaya, mengurangi erosi.
Fitovolatilisasi	Polutan dapat diubah menjadi bentuk yang lebih tidak beracun, kontaminan yang terlepas ke udara dapat terdegradasi secara alami.
Fitodegradasi	Biasanya terjadi pada kondisi dimana biodegradasi tidak memungkinkan. Enzim yang diproduksi oleh tumbuhan dapat dihasilkan pada kondisi bebas mikroorganisme, tumbuhan bisa hidup pada tanah steril dan kondisi toksik bagi mikroorganisme.
Rizofiltrasi	Pada tumbuhan darat, bisa mengakumulasi kontaminan lebih dari tumbuhan air. Rizofiltrasi bisa diterapkan secara in-situ dan ex-situ.
Kontrol/pompa hidrolik	Mencegah migrasi lindi menuju air tanah dan badan air, tidak membutuhkan sistem teknik tertentu, akar dapat menjangkau tanah lebih luas dibandingkan sumur pompa.
Fitoekstraksi	Teknologi ini dapat digunakan untuk meningkatkan nutrisi ternak. Biomassa yang dihasilkan bisa dikomposkan atau diinsenerasi, dan terkadang didaur ulang untuk digunakan kembali. Fitoekstraksi merupakan salah satu pendekatan yang menjanjikan untuk komersial.

Sumber: Leguizamo dkk., 2017

Fitoremediasi memiliki kelebihan maupun kekurangan. Tumbuhan yang digunakan harus berada pada media yang akan dihilangkan kontaminannya. Sehingga, karakteristik tanah, tingkat toksisitas, dan iklim harus mendukung pertumbuhan tanaman. Fitoremediasi juga dibatasi oleh kedalaman akar karena tumbuhan harus bisa menjangkau polutan. Kedalaman akar biasanya 50 cm untuk spesies rerumputan atau 3 m untuk pepohonan. Beberapa *pjreatophytes* yang mencari air hingga air tanah bisa mencapai kedalaman hingga 15 m atau lebih, terutama pada iklim kering.

Selain itu, fitoremediasi bisa lebih lama dibandingkan dengan teknik remediasi seperti penggalian, insenerasi, atau sistem *pump-and-treat*. Proses fitoremediasi dan degradasi polutan oleh tumbuhan cukup cepat (hari atau bulan), namun pembersihan tanah dengan akumulasi bisa bertahun-tahun. Fitoremediasi juga dibatasi oleh *bioavailability* polutan. *Bioavailability* polutan bisa ditingkatkan hingga batas tertentu dengan menambahkan *soil amandments* (Pilon-Smits, 2005). Secara ringkas, kelebihan dan kekurangan fitoremediasi dapat dilihat pada Tabel 3.8.

Tabel 3.8 Kelebihan dan Kekurangan Fitoremediasi

Kelebihan	Kekurangan
Bisa untuk berbagai jenis kontaminan organik maupun anorganik	Untuk remediasi yang tidak terlalu jauh dan masih berada pada zona akar
Bisa dilakukan secara in-situ dan eks-situ	Bisa memakan waktu hingga bertahun-tahun untuk meremediasi
Aplikasi secara in-situ mengurangi gangguan pada tanah dibandingkan metode konvensional	Terbatas untuk kontaminan dengan konsentrasi rendah
Mengurangi limbah yang dihasilkan (hingga 95%) dan bisa dijadikan sebagai <i>bio-ore</i>	Biomassa tumbuhan bekas proses fitoekstraksi dapat digolongkan sebagai limbah berbahaya yang harus dibuang dengan prosedur

Kelebihan	Kekurangan
	yang tepat
Aplikasi secara in-situ mengurangi persebaran kontaminan melalui udara dan air	Kondisi iklim menjadi faktor penghambat
Tidak memerlukan peralatan yang mahal dan tenaga ahli	Penggunaan spesies bukan asli bisa mempengaruhi keanekaragaman
Aplikasi dalam ukuran besar bisa menghasilkan energi potensial untuk energi panas	Penggunaan atau pemanfaatan biomassa tumbuhan yang tercemar menimbulkan kekhawatiran

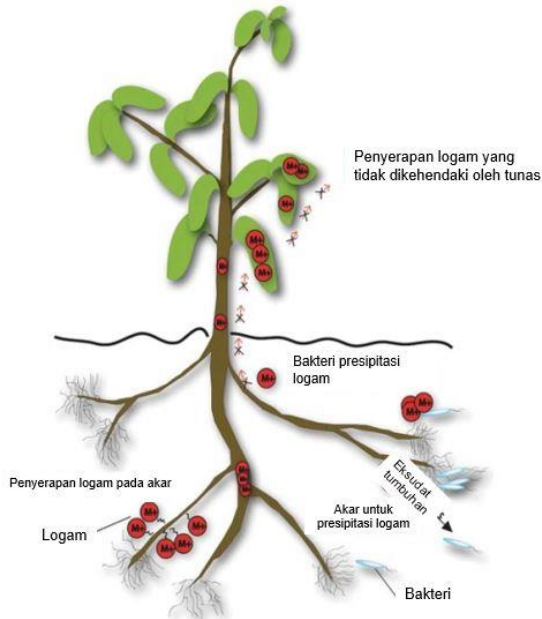
Sumber: Ghosh dan Singh, 2005

3.3.1 Fitostabilisasi

Fitostabilisasi merupakan manajemen strategi untuk menstabilkan (menonaktifkan) kontaminan yang berpotensi toksik (Vangronsveld dkk., 2009). Fitostabilisasi bertujuan untuk menangkap kontaminan agar berada pada zona *vadose* melalui akumulasi oleh akar atau presipitasi di *rhizosphere*. Fitostabilisasi juga merujuk pada penggunaan tutupan oleh tumbuhan pada permukaan tanah yang terkontaminasi, sehingga mengurangi paparan ke angin, air, dan kontak langsung ke manusia atau hewan. Pada fitostabilisasi, tumbuhan akan mengeluarkan eksudat yang akan menstimulasi bakteri dan proses biokimia dari pembentukan mineral logam. Fitostabilisasi bisa ditingkatkan dengan penggunaan *soil amendments* yang efektif dalam mengimobilisasi logam dan spesies tumbuhan yang toleran terhadap kontaminan dalam konsentrasi yang tinggi (Bolan dkk., 2011).

Fitostabilisasi tidak bertujuan untuk mengakumulasi pada tumbuhan, namun lebih pada pengikatan kontaminan agar tidak menyebar. Tidak adanya akumulasi kontaminan dalam jaringan tumbuhan sehingga memperkecil kemungkinan kontaminan masuk ke dalam rantai makanan. Tanah yang tercemar tidak perlu dipindahkan selama proses. Namun, tanah tidak bisa digunakan karena kontaminan tetap berada di dalamnya. Selain

itu, juga perlu monitoring secara berkala untuk memastikan kestabilan kontaminan hingga memenuhi regulasi yang ditetapkan.



Gambar 3.2 Proses Fitostabilisasi

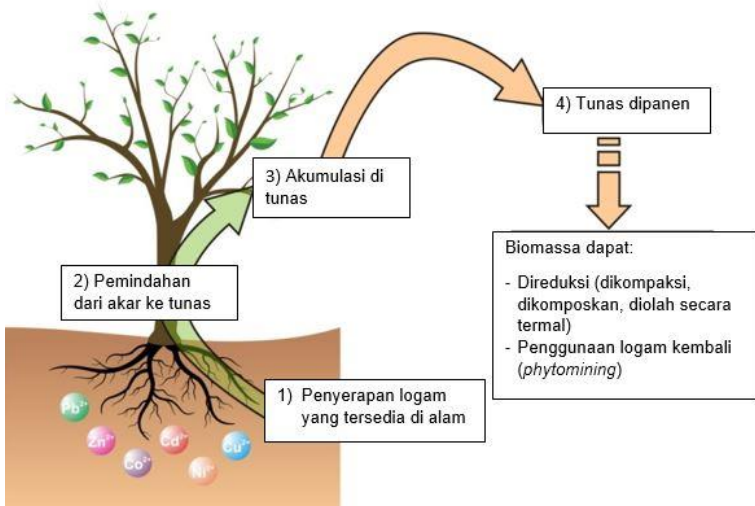
Sumber: Mendez dan Maier, 2008

3.3.2 Fitoekstraksi

Fitoekstraksi adalah proses pengambilan dan translokasi kontaminan logam di tanah oleh akar tumbuhan ke bagian yang berada di atas tanah (Vaněk dkk., 2010). Fitoekstraksi juga bisa digunakan untuk menyisihkan organik dari tanah dengan menyimpannya di bagian yang bisa dipanen (Vangronsveld dkk., 2009). Kontaminan yang terserap ke dalam tumbuhan umumnya yang terlarut di dalam air. Namun beberapa zat yang sukar terlarut air juga dapat terserap, misalnya minyak (Mangkoedihardjo dan Samudro, 2010). Beberapa jenis

tumbuhan, yang disebut hiperakumulator, menyerap logam dalam jumlah yang besar dibandingkan yang lainnya (Vaněk dkk., 2010). Menurut Garbisu dan Alkorta (2001), tumbuhan ideal untuk fitoekstraksi logam harus memenuhi beberapa kriteria berikut:

- Toleran terhadap logam dengan konsentrasi tinggi
- Mengakumulasi logam dengan konsentrasi tinggi pada bagian yang bisa dipanen
- Mempunyai laju pertumbuhan yang cepat
- Mempunyai potensi untuk menghasilkan biomassa tinggi
- Mempunyai sistem akar serabut



Gambar 3.3 Skema Proses Fitoekstraksi

Sumber: Favas dkk., 2014

Jenis tumbuhan ini dipilih dan ditanam di lapangan, berdasarkan jenis kontaminan dan kondisi lapangan. Tanaman dibiarkan tumbuh, lalu dipanen dan diinsenerasi atau dikomposkan untuk mendaur ulang logam. Prosedur ini bisa diulang selama diperlukan untuk menurunkan konsentrasi kontaminan ke batas yang diizinkan (baku mutu). Jika tanaman diinsenerasi, abu yang dihasilkan harus dibuang ke TPA limbah bahan berbahaya dan beracun (B3), tapi volume abu akan kurang

dari 10% dari volume yang akan dihasilkan jika tanah yang tercemar tersebut digali untuk pengolahan. Batasan pendekatan ini yaitu toksisitas logam terhadap tumbuhan, mekanisme penyerapan logam, translokasi dan akumulasi, dan waktu yang dibutuhkan untuk membersihkan lapangan ke batas yang diinginkan (Vaněk dkk., 2010).

3.3.3 Fitodegradasi

Fitodegradasi merupakan proses metabolisme kontaminan di dalam jaringan tumbuhan. Tumbuhan akan memproduksi enzim yang akan mempercepat degradasi. Kontaminan yang umumnya diremediasi menggunakan fitodegradasi adalah kontaminan organik seperti pelarut terklorinasi, herbisida, insektisida, dan nutrisi anorganik. Hanya kontaminan organik yang bisa didegradasi, sedangkan kontaminan anorganik hanya bisa distabilisasi, dipindahkan, atau disimpan. Hal ini dikarenakan kontaminan organik bisa dipecah menggunakan enzim. Enzim tumbuhan akan mengkatabolisme kontaminan organik menjadi komponen inorganik (seperti karbon dioksida, air, atau Cl_2) atau mendegradasi kontaminan menjadi cukup stabil dan disimpan di tumbuhan. Proses degradasi melibatkan enzim ini dapat terjadi di akar dan jaringan tumbuhan (Vishnoi dan Srivastava, 2008; Pilon-Smits dan Freeman, 2006; Pilon-Smits, 2005).

3.3.4 Fitovolatilisasi

Fitovolatilisasi terjadi ketika tumbuhan mengambil air yang mengandung kontaminan organik dan melepaskannya ke udara melalui daun. *Volatile organic compound* (VOC) bisa divolatilisasi oleh tumbuhan. Contoh polutan organik yang bisa divolatilisasi oleh tumbuhan adalah pelarut terklorinasi TCE dan MTBE. Fitovolatilisasi dapat ditingkatkan dengan beberapa cara. Untuk fitovolatilisasi VOC misalnya dapat dilakukan dengan menggunakan spesies *phreatophyte* dengan laju transpirasi tinggi dan dengan membantu transpirasi (mencegah penutupan stomata dengan irigasi yang memadai).

Fitovolatilisasi mampu menghilangkan polutan dari tanah sepenuhnya sebagai gas, tanpa memerlukan panen dan pembuangan tumbuhan. Namun apabila kontaminan merupakan

polutan yang toksik, dibutuhkan pengamatan gas di atmosfer sebagai analisis resiko (Pilon-Smits, 2005).

3.3.5 Rizofiltrasi

Rizofiltrasi adalah penggunaan akar tanaman untuk menyerap dan mengendapkan logam berat dalam efluen tercemar. Proses penyerapan merupakan ikatan ionik yang terjadi akibat perbedaan muatan ion kontaminan dan ion akar. Ion akar, misalnya bikarbonat (HCO_3^-) akan mengikat kation kontaminan, misalnya logam berat. Tumbuhan ditanam dalam media air, bukan tanah. Air terkontaminasi akan digunakan untuk aklimatisasi tumbuhan. Tumbuhan kemudian akan ditanam pada lokasi yang tercemar, dimana akar akan menyerap air dan kontaminan. Setelah akar jenuh oleh kontaminan, tumbuhan kemudian dipanen beserta akarnya. Tumbuhan air mempunyai efisiensi yang rendah karena akar yang kecil dan lambat tumbuh. Sedangkan tumbuhan darat akan menghasilkan sistem akar yang lebih panjang dan lebat sehingga akan mempunyai area permukaan yang luas. Hal inilah yang menyebabkan pada tumbuhan darat, bisa mengakumulasi kontaminan lebih dari tumbuhan air (Dushenkov dkk., 1995; Abdullahi, 2005; Mangkoedihardjo dan Samudro, 2010; Leguizamo dkk., 2017).

3.3.6 Rizodegradasi

Eksudat akar yang mengandung gula, asam amino, dan asam organik akan meningkatkan perkembangan bakteri dan jamur dalam pembentukan *rhizosphere*. Hal ini akan meningkatkan biomassa mikroba dibandingkan dengan tanah yang tidak ditumbuhi tanaman. Dalam fitoremediasi, proses ini akan meningkatkan perkembangan bakteri dan jamur untuk meningkatkan kapasitas tanah untuk mengurai pestisida. Tumbuhan juga mampu memodifikasi struktur komunitas mikroba yang berperan dalam penguraian komponen tersebut (Ceppa, 2011). Kontaminan yang menjalani proses mikrobiologis yaitu kontaminan organik yang mudah terurai yang dapat terukur sebagai BOD dan kontaminan anorganik seperti amonium, nitrit, dan logam berat (Mangkoedihardjo dan Samudro, 2010).

3.4 Kelompok jenis tumbuhan *terrestrial* untuk remediasi tanah tercemar lindi

Dari berbagai literatur mengenai karakteristik tanah tercemar lindi dan jenis tumbuhan untuk fitoremediasi, maka dikaji jenis tumbuhan yang cocok untuk remediasi tanah tercemar lindi. Tanah tercemar lindi memiliki kontaminan organik dan anorganik, sehingga dapat dikelompokkan jenis tumbuhan berdasarkan kontaminan seperti pada Tabel 3.8 dan 3.9.

Pencemar utama dalam lindi yaitu organik yang tinggi serta logam berat. Nilai organik pada lindi ditunjukkan oleh konsentrasi BOD, COD, dan TOC. Nilai BOD merupakan jumlah oksigen yang dibutuhkan oleh mikroorganisme untuk mendegradasi senyawa organik. Oleh karenanya, tes BOD merupakan pengukuran senyawa organik secara tidak langsung (Hazelton dan Murphy, 2007). Sedangkan nilai COD merupakan jumlah oksigen yang diperlukan untuk mendegradasi seluruh senyawa organik. Tes COD mengukur semua organik karbon dengan pengecualian senyawa aromatik tertentu (benzene, toluene, fenol, dll.) yang tidak sepenuhnya teroksidasi di dalam reaksi. COD merupakan reaksi oksidasi secara kimia/termal, sehingga senyawa lain yang tereduksi seperti sulfida, sulfit, dan besi akan teroksidasi dan terukur sebagai COD. Amonia tidak akan teroksidasi sebagai COD (Anonim, 2003).

Dengan demikian, baik BOD dan COD secara tidak langsung menunjukkan nilai senyawa organik. Senyawa organik sendiri merupakan senyawa yang mengandung karbon. Senyawa organik bisa berupa hidrokarbon yang tidak terklorinasi, halogen, dan lainnya. Sehingga, BOD dan COD pada lindi merupakan jumlah oksigen untuk mendegradasi senyawa tersebut. Untuk itu, dipilih tumbuhan yang mampu meremediasi kontaminan organik seperti hidrokarbon dan halogen.

Beberapa unsur anorganik merupakan nutrisi yang dibutuhkan oleh tumbuhan, baik dalam jumlah yang besar maupun kecil. Beberapa unsur esensial seperti N, P, dan K dibutuhkan oleh tumbuhan untuk pertumbuhan. Oleh karena itu, pada proses remediasi tanah tercemar lindi ketiga kontaminan ini diasumsikan akan berkurang seiring waktu karena pertumbuhan tanaman. Nitrogen mempunyai peran yang penting dalam sistem

metabolisme tumbuhan. Semua proses vital pada tumbuhan berkaitan dengan protein, dimana nitrogen merupakan unsur esensialnya. Dari unsur esensial, nitrogen dibutuhkan dalam jumlah yang paling banyak. Kekurangan nitrogen menyebabkan melambatnya pertumbuhan, terjadinya klorosis (perubahan warna daun dari hijau menjadi kuning), munculnya bintik merah dan ungu pada daun, dan membatasi pertumbuhan lateral tunas (Leghari dkk., 2016; Razaq dkk., 2017).

Amonium (NH_4^+) merupakan salah satu nutrisi utama untuk tumbuhan dan berada dimanapun dalam metabolisme tumbuhan. Banyak jenis tumbuhan yang terkena efek toksik ketika terpapar amonium dalam konsentrasi yang tinggi. Gejala ini tidak muncul ketika tumbuhan terpapar oleh nitrat (NO_3^-) atau campuran nitrogen. Efek toksik ini menyebabkan pertumbuhan melambat, daun kecil, akar kerdil, penurunan fotosintesis, jumlah kation yang lebih rendah, bahkan klorosis. Sehingga penting untuk menguji kapasitas jenis tumbuhan dalam memanfaatkan amonium (Horchani dkk., 2010; Yao dkk., 2011).

Percobaan oleh Glenn dkk. (2017) menunjukkan adanya penurunan nitrat dan amonium di tanah dengan cara revegetasi menggunakan tumbuhan perdu lokal. Selain itu, strategi ini bisa memperlambat atau menghentikan kontaminasi nitrat dan amonium ke air tanah. Hal ini mungkin disebabkan oleh proses mikrobial yang dibantu dengan irigasi, menyebabkan penurunan nitrat dan N meningkat karena denitrifikasi. Denitrifikasi 8 kali lebih tinggi pada tanah ditumbuhi tanaman dibandingkan yang tidak. Setelahnya, amonium juga menurun akibat proses nitrifikasi dan denitrifikasi di tanah dan akuifer.

Fosfor sangat penting untuk pertumbuhan tanaman. Unsur ini penting untuk pembelahan sel, perkembangbiakan, dan metabolisme tumbuhan. Selain itu, fosfor juga berperan penting terhadap perolehan, penyimpanan, dan penggunaan energi. Kekurangan fosfor akan menyebabkan pertumbuhan tanaman terhambat, seperti tidak atau sedikit menghasilkan bunga, mempunyai sistem perakaran yang lemah, dan corak hijau cerah atau keunguan (Rhoades, 2017; Razaq dkk., 2017).

Kalium memegang berbagai peran penting bagi tumbuhan. Kalium merupakan aktivator enzim yang berperan bagi pertumbuhan tanaman. Selain itu, kalium juga berperan dalam membuka dan menutup stomata, fotosintesis, transporatasi gula, air, dan nutrisi, serta sintesis protein dan pati (Prajapati dan Modi, 2012). Unsur lain yang juga dibutuhkan adalah silika (Si). Silika terdapat dengan jelas di lingkungan, namun tidak dianggap sebagai unsur yang esensial untuk pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan. Pada banyak studi menunjukkan efek positif Si pada pertumbuhan dan fisiologi tumbuhan, terutama pada lingkungan biotik dan abiotik yang tercemar, termasuk tercemar Si (Tripathi dkk., 2016).

Beberapa logam berat (Fe, Mn, Mg, Zn, Cu, dan Mo) juga merupakan nutrisi yang dibutuhkan oleh tumbuhan. Magnesium berperan penting dalam fotosintesis tumbuhan. Tanpa magnesium, klorofil tidak bisa menangkap energi dari matahari yang dibutuhkan untuk fotosintesis. Magnesium juga digunakan tumbuhan untuk metabolisme karbohidrat dan stabilisasi membran sel (Patterson, 2016).

Tumbuhan secara alami akan menyerap berbagai nutrisi esensial, yang juga merupakan berbagai kontaminan pada lindi. Oleh karenanya, tumbuhan yang dipilih merupakan yang tahan terhadap kontaminan yang tidak esensial seperti PAHs atau logam Cd. Diketahui berbagai jenis tumbuhan dan kemampuannya dalam meremediasi berbagai jenis kontaminan. Dari kedua tabel di atas, bisa dihitung faktor biokonsentrasi atau *bioconcentration factor* (BF) dengan rumus berikut:

$$BF = \frac{\text{Konsentrasi rata-rata zat pada tumbuhan}}{\text{Konsentrasi di tanah}}$$

(Yadav dkk., 2009)

Tumbuhan dengan $BF < 1$ menunjukkan bahwa zat atau kontaminan tidak berpotensi terakumulasi dalam tumbuhan tersebut. Sedangkan tumbuhan yang memiliki $BF > 1$ mengindikasikan bahwa kontaminan terakumulasi di dalam tumbuhan (Mangkoedihardjo dan Samudro, 2010). Sebagai contoh yaitu kemampuan alfalfa dalam meremediasi kontaminan

anorganik seperti pada Tabel 3.9. Berdasarkan perhitungan, alfalfa pada kontaminan Se.

$$\text{BF alfalfa, Se} = \frac{\text{Konsentrasi rata-rata zat pada tumbuhan}}{\text{Konsentrasi di tanah}}$$

$$\text{BF alfalfa, Se} = \frac{30,33 \text{ mg/kg}}{10 \text{ mg/kg}}$$

$$\text{BF alfalfa, Se} = 3,03$$

Berdasarkan perhitungan, diperoleh BF tumbuhan alfalfa pada kontaminan Se adalah sebesar 3,03 yang berarti alfalfa berpotensi mengakumulasi Se. Beberapa kemampuan tumbuhan dalam remediasi kontaminan organik dan anorganik dapat dilihat pada Tabel 3.9.

Adapun pemilihan jenis tumbuhan untuk remediasi tanah tercemar lindi bisa disesuaikan dengan berbagai kandungan kontaminan di dalam tanah. Konsentrasi pencemar di dalam tanah kemudian dibandingkan dengan baku mutu atau indeks tanah tidak tercemar. Di Indonesia, belum terdapat peraturan perundang-undangan yang memuat baku mutu tanah. Bisa digunakan berbagai nilai ambang yang terdapat pada Tabel 3.10 dan dibandingkan dengan hasil uji laboratorium. Dari perbandingan akan diketahui parameter yang melebihi nilai ambang, kemudian ditentukan tumbuhan yang bisa digunakan untuk meremediasi.

Selain dari jenis kontaminan, perlu dikaji jenis tumbuhan yang digunakan berdasarkan sebaran lindi pada tanah. Tidak adanya lapisan penutup, rusaknya lapisan penutup, atau tidak berfungsinya saluran lindi mampu menyebabkan pencemaran lindi pada tanah. Pada penjelasan sub bab 3.1 telah dijelaskan mengenai persebaran lindi pada tanah. Diketahui penyebaran lindi pada tanah bisa mencapai kedalaman hingga 20 m dan jarak mencapai 410 m dari lokasi TPA.

Tabel 3.9 Jenis-jenis Tumbuhan untuk Kontaminan Organik dan Anorganik

Nama tumbuhan	Jenis kontaminan	% Penyisihan/ Akumulasi	Konsentrasi awal	BF	Keterangan
Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)	PAHs	56% ¹⁾	200 mg/kg		
	Cd	>200 mg/kg ²⁾	20 mg/l	>10	Hidroponik
	Pb	~600 mg/kg ²⁾	200 mg/l	~3	Hidroponik
	Ni	174 ppm ³⁾	80 ppm	2,17	Media tanah; pH 5,8
	Zn	398 ppm ³⁾	160 ppm	2,49	Media tanah; pH 4,5
	Cu	522 ppm ³⁾	160 ppm	3,26	Media tanah; pH 5,8
	Se	30,33 mg/kg ⁴⁾	10 mg/kg	3,03	Media tanah
Rumput teki (<i>Cyperus</i>)	Minyak mentah	50,01% ⁵⁾	2,5% minyak mentah		Media tanah
Vetiver/akar wangi (<i>Chrysopogon zizanioides</i> atau <i>Vetiveria zizanioides</i>)	TCE	98% ⁶⁾	549 mg/kg		Media tanah
	Phenanthrene	40,7% ⁷⁾	59,43 mg/kg		+1% kompos
	Pyrene	60,4% ⁷⁾	49,12 mg/kg		+1% kompos
	Pb	31,12 mg/kg ⁸⁾			Hidroponik
		100% ⁹⁾	1,03 mg/l		Hidroponik
	Zn	139,68 mg/kg ⁸⁾			Hidroponik
	Cu	28,92 mg/kg ⁸⁾			Hidroponik
	Fe	1271,73 mg/kg ⁸⁾			Hidroponik
	Mn	188,04 mg/kg ⁸⁾			Hidroponik
	Cr	~175 ppm ¹⁰⁾	623 ppm	~0,3	Media tanah
	Se	43,93 mg/kg ⁴⁾	10 mg/kg	4,4	Media tanah
	Hg	100% ⁹⁾	2,5 mg/l		Hidroponik
	Cd	0,298 mg/kg ¹¹⁾	0,116 mg/kg	2,57	Media tanah

Nama tumbuhan	Jenis kontaminan	% Penyisihan/ Akumulasi	Konsentrasi awal	BF	Keterangan
Bunga matahari (<i>Helianthus annuus</i>)	Cd	327,34 mg/kg ²⁾	20 mg/l	16,4	Hidroponik
	Pb	917,82 mg/kg ²⁾	200 mg/l	4,6	Hidroponik
	Co	43,7% ¹²⁾	83 mg/kg		Media tanah
	Cr	41,6% ¹²⁾	148 mg/kg		Media tanah
Sawi (<i>Brassica</i>)	Cd	~200 mg/kg ²⁾	20 mg/l	~10	Hidroponik
	Pb	835,54 mg/kg ²⁾	200 mg/l	4,17	Hidroponik
	U	>5000 mg/kg ¹³⁾	750 mg/kg	>6,7	Media tanah
	V	18,85 mg/g ¹⁴⁾	17 mg/g	1,1	Media tanah
Kangkung darat (<i>Ipomoea reptans</i> <i>Poir</i>)	Se	>400 mg/kg ¹⁵⁾	1 mg/kg	>400	Media tanah
	Cd	1164,65 mg/kg ¹⁶⁾	50 mg/kg	23,3	Media tanah
		125,6 mg/kg ¹⁷⁾	50 ppm	2,5	Media tanah
	Cr	136,79 mg/kg ¹⁷⁾	50 ppm	2,7	Media tanah
Astragalus/Huang qi	Ni	699,86 mg/kg ¹⁷⁾	100 ppm	6,99	Media tanah
	Se	20 – 40 mg/g berat kering ¹⁸⁾	2 – 10 ppm		Media tanah
Jarak pagar (<i>Jatropha curcas</i>)	Hg	1,07±0,13 µg/g ¹⁹⁾	1 µg/g	1,07	Media tanah
	Cr	8,46±1,54 mg/kg ²⁰⁾	100 mg/kg	0,08	Media tanah
	As	16,78±1,01 mg/kg ²⁰⁾	100 mg/kg	0,17	Media tanah
	Zn	298,3±21,5 mg/kg ²⁰⁾	1000 mg/kg	0,29	Media tanah
Kayu putih/leda (<i>Eucalyptus</i>)	Cd	4,67 mg/kg ²¹⁾	0,67±0,12mg/kg	6,9	Media tanah
	Zn	88,3 mg/kg ²²⁾	35,67 mg/kg	2,47	Media tanah
	Ni	12,05 mg/kg ²²⁾	26,71 mg/kg	0,45	Media tanah
	Cr	183,31 mg/kg ²²⁾	102,92mg/kg	1,78	Media tanah
	Cu	15 mg/kg ²²⁾	24,55 mg/kg	0,61	Media tanah
	Pb	15,26 mg/kg ²²⁾	13,85 mg/kg	1,1	Media tanah

Nama tumbuhan	Jenis kontaminan	% Penyisihan/ Akumulasi	Konsentrasi awal	BF	Keterangan
	Sn	1885,29 mg/kg ²²⁾	2479,47mg/kg	0,76	Media tanah
	Se	13,3 mg/kg ²³⁾	5 mg/kg	2,66	Media tanah

Sumber: 1) Pradhan, 1998

2) Zhin-xin, 2007

3) Peralta-Videa, 2002

4) Rasooli dkk., 2015

5) Basumatary, 2012

6) Janngam, 2010

7) Nisa dan Rashid, 2015

8) Roongtanakiat, 2009

9) Girija dkk., 2016

10) Antiochia dkk., 2007

11) Patandangan dkk., 2016

12) Lotfy dan Mostafa, 2014

13) Huang dkk., 1998

14) Elektorowicz dan Keropian, 2015

15) Banuelos dkk., 1999

16) Liong dkk., 2009

17) Muliadi dkk., 2013

18) Hung dkk., 2012

19) Marrugo-Negrete dkk., 2015

20) Yadav dkk., 2009

21) Luo dkk., 2015

22) Daniel dkk., 2012

23) Dhillon dkk., 2008

Tabel 3.10 Nilai Ambang Logam Berat dalam Tanah

Logam	Nilai ambang dalam tanah (ppm)
As	0,1 – 4 ¹⁾ 5 – 3000 ²⁾ 5 – 10 ³⁾
B	2 – 100 ¹⁾
F	30 – 300 ¹⁾
Cd	0,1 – 7 ¹⁾ 0,05 – 0,7 ²⁾ 0,1 – 1 ³⁾
Mn	100 – 4000 ¹⁾
Ni	10 – 1000 ¹⁾
Zn	10 – 300 ^{1) 2)}
Cu	2 – 100 ¹⁾ 1 – 300 ²⁾
Pb	2 – 200 ^{1) 2)} 10 – 20 ³⁾
Co	1 – 40 ²⁾
Hg	0,01 – 0,3 ²⁾ 0,01 – 0,06 ³⁾
Se	0,4 ³⁾
Cr	20 ⁴⁾

Sumber: 1) Pickering (1980) dalam Erfandi dan Juarsah (2014)

2) Darmono (1995) dalam Ulfah dan Dewi (2015)

3) Ferguson (1990) dalam Ulfah dan Dewi (2015)

4) DPR-EGASPIN (2002) dalam Wuana dan Okiemen (2011)

Dengan kedalaman mencapai 20 m, maka diperlukan tumbuhan dengan perakaran tunggang untuk bisa mencapai polutan. Karena itu, diperlukan pepohonan sebagai salah satu jenis tumbuhan untuk remediasi tanah tercemar lindi TPA. Pepohonan seperti *willow* dan *poplar* mampu menjadi *phytocapping*, yang membantu mengurangi infiltrasi air hujan ke tanah sehingga mengurangi pergerakan kontaminan. Namun, kelemahan penggunaan pepohonan untuk remediasi adalah pertumbuhannya yang lebih lambat jika dibandingkan dengan jenis seperti rerumputan (Allen, 2002).

Willow (*Salix spp.*) mempunyai pertumbuhan yang cepat, biomassa yang tinggi, sistem perakaran yang dalam, dan kemampuan untuk menyerap logam berat dalam konsentrasi tinggi (Pajević, 2016). *Willow* mempunyai akar yang dapat tumbuh hingga lebih dari 14 m. Selain itu, akar *willow* bisa tumbuh sepanjang 5 – 11 m dalam 9 bulan penanaman (Phillips dkk., 2014). Perakaran yang dalam ini bisa diterapkan untuk remediasi tanah tercemar lindi dengan kedalaman lebih dari 5 m.

Willow mampu bertahan hidup di tanah tercemar lindi yang mengandung logam berat. *Willow* mampu menyerap dan mentranslokasikannya logam berat Cd dan Zn ke bagian di atas tanah, sedangkan As, Cr, Ni, Cu, dan Pb tertahan di bagian akar (Phillips dkk., 2014). Selain itu, *willow* mampu menurunkan konsentrasi mineral minyak hingga 57% dan PAHs sebesar 32% (Vervaeke dkk., 2003). *Willow* mempunyai penyerapan nutrisi yang efisien (Pulford, 2003) sehingga cocok untuk tanah tercemar lindi yang mengandung nutrisi yang tinggi. Selain itu, *willow* mempunyai laju evapotranspirasi yang tinggi, sehingga memungkinkan penyerapan lindi dalam tanah juga berlangsung dengan cepat.

Poplar juga merupakan jenis pepohonan yang memiliki laju pertumbuhan yang cepat. *Poplar* mampu menyerap Cd, Zn, dan Al dengan efisien jika dibandingkan dengan logam berat lainnya (Pajević, 2016). Penelitian oleh Widdowson dkk. (2005) menemukan bahwa konsentrasi PAHs di tanah maupun air tanah berkurang selama 3 – 4 musim tanam *poplar*. Namun terdapat keterbatasan jenis PAHs yang bisa diremediasi oleh *poplar*, yaitu *naphthalene* dan beberapa PAHs cincin tiga (*acenaphthylene* dan *acenaphthene*). Selain PAHs, *poplar* juga mampu mendegradasi PCB dengan bantuan mikroorganisme di zona akar (Meggo dan Schnoor, 2013).

Sama seperti *willow*, *poplar* memiliki laju evapotranspirasi yang tinggi, sistem perakaran yang luas, dan produksi akar yang melimpah. Akar lateral *poplar* bisa tumbuh hingga 2,6 m dan panjang total akar 3,5 – 11,8 m dalam 3 tahun pertumbuhan (Douglas dkk., 2016). Sedangkan pada penelitian oleh Phillips dkk. (2014), akar *poplar* bisa tumbuh sepanjang 2,5 – 5,5 m

dalam 9 bulan pertumbuhan. *Poplar* bisa tumbuh hingga 24 – 150 m dengan panjang akar 2 – 3 kali lipat, yang berarti sepanjang 48 – 135 m (Rockwood, 2008). Dengan perakaran yang sangat dalam ini, *poplar* cocok digunakan untuk remediasi tanah tercemar lindi dengan kedalaman lebih dari 5 m.



Gambar 3.4 *Poplar*

Sumber: Siegmund, 2006

Namun pohon *willow* dan *poplar* tidak bisa ditemukan di Indonesia karena habitatnya yang beriklim subtropis (Mansur, 2015). Oleh karena itu, kedua pepohonan tersebut tidak bisa digunakan dalam remediasi di Indonesia. Selain habitat yang berbeda, apabila diterapkan akan memakan biaya yang tinggi untuk impor.

Pepohonan lain yang berpotensi untuk digunakan dalam remediasi tanah tercemar lindi yaitu *Eucalyptus* (kayu putih/leda). *Eucalyptus* mempunyai sistem perakaran dangkal yang berada tepat di bawah permukaan tanah dan perakaran dalam yang mencapai akuifer. Akar dangkal tumbuh secara horizontal sepanjang 3 – 5 m, yang berfungsi untuk menyerap kelembaban di permukaan tanah. Sedangkan akar dalam bisa tumbuh hingga 9 m hingga ke lapisan dalam tanah. *Eucalyptus* merupakan akumulator yang efektif untuk senyawa organik dan anorganik. Meskipun *Eucalyptus* mengakumulasi logam berat dengan konsentrasi yang lebih rendah dibandingkan tumbuhan hiperakumulator, penggunaan *Eucalyptus* sebagai bioakumulator bisa mengurangi resiko kontaminan masuk ke dalam rantai

makanan karena tidak dikonsumsi oleh manusia. *Eucalyptus* merupakan bioakumulator yang efektif untuk logam berat Pb, Zn, dan Cr (Bilal dkk., 2014).

Jarak pagar merupakan tumbuhan yang berasal dari Meksiko dan Amerika tengah serta bisa ditemukan di daerah tropis (Pandey dkk., 2012). Jarak pagar merupakan tumbuhan berkayu yang mempunyai sistem perakaran tunggang. Jarak pagar juga merupakan tumbuhan yang toleran terhadap berbagai logam berat seperti Hg, Cr, As, dan Zn.

Selain pepohonan, diperlukan juga tumbuhan dengan pertumbuhan cepat untuk mempercepat remediasi tanah. Rerumputan bisa menjadi salah satu alternatif untuk remediasi tanah tercemar lindi disamping pepohonan. Rumput selain mempunyai pertumbuhan yang cepat, juga merupakan tanaman non pangan sehingga mencegah masuknya kontaminan toksik ke dalam rantai makanan. Rumput mempunyai perakaran serabut, dimana akan menjadi penutup luasan tanah yang tercemar. Selain itu, rumput akan menyerap air hujan sehingga mengurangi pergerakan lindi di tanah.

Beberapa rerumputan memiliki perakaran yang cukup panjang. Rumput vetiver atau akar wangi memiliki akar dengan panjang mencapai 5,2 m (Aryanto, 2012), sehingga bisa digunakan untuk tanah tercemar lindi yang tidak terlalu dalam seperti pada kasus TPA Babakan, Ciparay. Rumput vetiver menggunakan air cukup banyak dibandingkan tumbuhan lain jika digunakan pada *wetland*. Diestimasi dalam 1 kg biomassa kering, rumput vetiver menggunakan air sebanyak 6,86 l/hari (Dahn dkk., 2009). Hal ini menunjukkan proses transpirasi yang berjalan dengan cepat, sehingga memungkinkan penyerapan lindi dalam tanah juga berlangsung dengan cepat.

Rumput vetiver mempunyai potensi sebagai hiperakumulator logam berat Pb dan Zn. Penggunaan penambahan bahan organik bisa meningkatkan ketahanan, pertumbuhan, dan biomassa vetiver. Penggunaannya juga bisa meningkatkan penyerapan As, sementara menurunkan penyerapan Pb, Zn, dan Cu serta tidak berpengaruh pada penyerapan Cd (Dahn dkk., 2009).

Cyperus merupakan salah satu rerumputan yang digunakan untuk remediasi tanah maupun air. *Cyperus* lebih suka hidup di kondisi kering, namun bisa juga hidup di tanah basah (Martin dan Chanthy, 2009). *Cyperus* mampu mendegradasi TPH mencapai 78% dengan penambahan pupuk pada tanah (Basumatary dkk., 2012). Salah satu spesies yaitu *Cyperus rotundus* mampu mengakumulasi logam berat Pb dan Cr (Nazir dkk., 2011; Sundaramoorthy dkk., 2010).

Alfalfa dapat mendegradasi PAHs hingga 56% pada konsentrasi awal 200 mg/kg (Pradhan, 1998). Alfalfa mampu menghilangkan Pb, Ni, dan Zn hingga lebih dari 90% serta lebih dari 70% Cd (Gardea-Torresdey dkk., 1998). Alfalfa merupakan tumbuhan yang mengonsumsi banyak air dan kekurangan air bisa menyebabkan penurunan laju pertumbuhan alfalfa (Saeed dan El-Nadi, 1997). Hal ini akan membuat alfalfa sebagai pompa hidrolik dimana alfalfa akan menyerap air dan membuat lindi bisa terangkat ke lapisan tanah yang lebih luar. Akar alfalfa dapat tumbuh hingga 140 cm dalam 2 tahun penanaman (Rasse dkk., 1998). Berbagai rerumputan lain juga dapat digunakan, terutama yang telah diteliti mampu meremediasi logam berat maupun kontaminan organik.

Meskipun tumbuhan pangan juga bisa menyerap berbagai kontaminan, penggunaannya untuk TPA tidak diperbolehkan. Menurut Peraturan Menteri Pekerjaan Umum nomor 3 tahun 2013 tentang Penyelenggaraan Prasarana dan Sarana Persampahan dalam Penanganan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga, lahan TPA pasca penutupan diperuntukkan untuk ruang terbuka hijau (RTH) dan tumbuhan pangan tidak boleh digunakan. Hal ini disebabkan oleh kekhawatiran terdapat kontaminan yang bisa masuk ke dalam rantai makanan.

Dari seleksi berdasarkan kontaminan serta kedalaman akar maka, tumbuhan yang berpotensi untuk digunakan dalam remediasi pencemaran lindi pada tanah dapat dilihat di Tabel 3.11. Tumbuhan inilah yang nantinya akan dikaji untuk penerapan secara campuran.

Tabel 3.11 Tumbuhan untuk Remediasi Tanah Tercemar Lindi

Nama Tumbuhan	Kontaminan	Konsentrasi Pencemaran	Penggunaan
Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)	PAHs Cd Pb Ni Zn Cu Se	200 mg/kg 20 mg/l 200 mg/l 100 ppm 150 ppm 150 ppm 10 mg/kg	Untuk pencemaran dengan kedalaman < 5 m
Vetiver/akar wangi (<i>Chrysopogon zizanioides</i>)	TCE Phenanthrene Pyrene Pb Se Hg Cd	550 mg/kg 60 mg/kg 50 mg/kg 1 mg/l 10 mg/kg 2,5 mg/l 0,1 mg/kg	Untuk pencemaran dengan kedalaman < 5 m
Bunga matahari (<i>Helianthus annuus</i>)	Cd Pb Co Cr	20 mg/l 200 mg/l 80 mg/kg 150 mg/kg	Untuk pencemaran dengan kedalaman < 5 m
Astragalus/Huang qi	Se	2 – 10 ppm	Untuk pencemaran dengan kedalaman < 5 m
Jarak pagar	Hg	1 µg/g	Untuk pencemaran dengan

Nama Tumbuhan	Kontaminan	Konsentrasi Pencemaran	Penggunaan
(<i>Jatropha curcas</i>)			kedalaman > 5 m
Kayu putih/leda (<i>Eucalyptus</i>)	Cd Zn Cr Pb Se	1 mg/kg 35 mg/kg 100 mg/kg 15 mg/kg 5 mg/kg	Untuk pencemaran dengan kedalaman > 5 m

Sumber: Hasil analisis

3.5 Kajian potensi aplikasi *mixed plants* untuk remediasi tanah tercemar lindi

Kajian potensi aplikasi dilakukan dengan mengkaji penggunaan *mixed plants* dalam remediasi tanah tercemar. Dari kajian penggunaan tumbuhan campuran, maka akan dianalisis dalam penggunaannya pada tanah tercemar lindi.

3.5.1 *Athyrium yokoscense* dan *Arabis flagellosa*

Studi oleh Chen dkk. (2009) membandingkan penyerapan Zn dan Cd oleh *Athyrium yokoscense* dan *Arabis flagellosa*. Hasil penelitian menunjukkan terjadi hambatan pada pertumbuhan *Arabis flagellosa* pada kondisi campuran. Hal ini mungkin disebabkan oleh kurangnya paparan cahaya yang didapatkan akibat daun *Athyrium yokoscense*. Sebaliknya, pertumbuhan *Athyrium yokoscense* pada kondisi campuran jauh lebih baik dibandingkan pada kondisi individual.

Tidak terjadi perubahan yang signifikan akan konsentrasi Zn dan Cd pada kondisi campuran jika dibandingkan secara individu. Selain itu, akumulasi Cd dan Zn berbanding lurus pada kondisi campuran dan individu. Hal ini menunjukkan bahwa akumulasi Zn dan Cd menggunakan kedua tumbuhan dipengaruhi oleh kemampuan penyerapan dan *translocation* logam dari akar menuju tunas. Secara keseluruhan, konsentrasi Cd di tunas *Athyrium yokoscense* sedikit lebih tinggi pada kondisi campuran dibandingkan kondisi individu.

Dalam penelitian oleh Chen dkk. (2009) dengan tumbuhan *Athyrium yokoscense* dan *Arabis flagellosa* menggunakan sistem *rhizobox*. Desain *rhizobox* meliputi kompartemen tanah-akar dan satu atau lebih kompartemen tanah yang berdekatan yang dipisahkan oleh membran berpori. Pori membran memungkinkan untuk pertukaran larutan, namun tidak untuk penetrasi akar dari kompartemen tanah-akar (Wenzel dkk., 2001). *Rhizobox* yang digunakan mempunyai dimensi 155 mm x 175 mm x 185 mm (panjang x lebar x tinggi). Setiap *rhizobox* terdiri dari kompartemen tengah (CC) setebal 2 mm. Kompartemen tengah diapit oleh 3 kompartemen sisi dengan tebal 1 mm masing-masing dan kompartemen *bulk soil*. Setiap kompartemen dipisahkan oleh kain nilon (bukaan 25 μ m).

kompartemen tengah, sisi, dan *bulk soil* diisi dengan tanah seberat 51, 25,5, dan 1030 gram (berat kering). Skema sistem *rhizobox* dapat dilihat pada Gambar 3.7.

Kedua tumbuhan ditanam di CC pada waktu yang bersamaan agar akar dapat tersebar dengan rata. *Rhizobox* diletakkan dengan posisi horizontal dan akar disebar dengan rata lalu ditutup dengan tanah. Pada perlakuan tumbuhan campuran, *Arabis flagellosa* dan *Athyrium yokoscense* ditanam di CC secara bergantian. Tumbuhan ditanam pada siklus 12 jam suhu 25°C siang hari dan 12 jam suhu 20°C malam hari selama 3 bulan. Selama pertumbuhan, air disuplai ke setiap kompartemen dan kelembaban tanah dijaga sebesar 40% dari *field capacity*.

Pengaruh akar pada reaksi biologis dan kimia di tanah seringkali sulit untuk dipelajari. Sistem *rhizobox* berguna untuk mengamati pengaruh akar pada tanah, mikroorganisme, nutrisi, dan elemen lain dengan membatasi pertumbuhan akar. Metode untuk sistem *rhizobox* membutuhkan banyak tenaga dan waktu, terlebih jika semakin banyak jumlah dan besar dimensi dari kompartemen (Hylander, 2002). Oleh karena itu, penggunaan sistem *rhizobox* dirasa kurang cocok dalam skala besar.



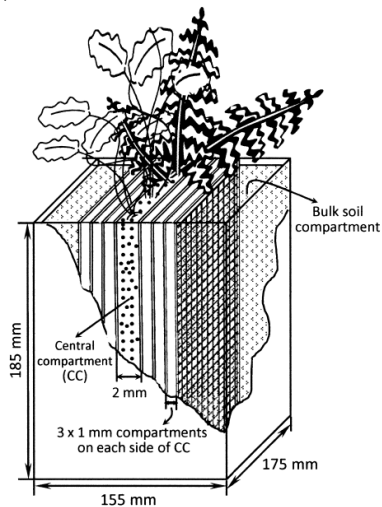
Gambar 3.5 *Athyrium yokoscense*

Sumber: Christ, 2010



Gambar 3.6 *Arabis flagellosa*

Sumber: Anonim, 2008



Gambar 3.7 Skema sistem *rhizobox*

Sumber: Chen dkk., 2009

3.5.2 *Brassica campestris* dan *Medicago sativa*

Pada penelitian yang dilakukan oleh Pan dkk. (2014), digunakan 2 jenis tumbuhan, *Brassica campestris* dan *Medicago sativa*, dan dibandingkan pada penanaman secara individu dan campuran. Efisiensi *removal* PAHs jenis Phenanthrene (Phe) dan Pyrene (Pyr) dapat dilihat pada Tabel 3.12.

Tabel 3.12 Efisiensi Remediasi PAHs menggunakan *Brassica campestris* dan *Medicago sativa*

Tumbuhan	PAHs	
	Phenanthrene (Phe)	Pyrene (Pyr)
<i>Brassica campestris</i>	31,8%	27,84%
<i>Medicago sativa</i>	64,03%	51,93%
<i>Brassica campestris</i> dan <i>Medicago sativa</i>	75,06%	68,22%

Sumber: Pan dkk., 2014

Remediasi menggunakan tumbuhan campuran menunjukkan angka *removal* yang lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan tumbuhan secara individu. Hal ini menunjukkan penggunaan tumbuhan campuran layak digunakan dalam meremediasi PAHs di tanah.

3.5.3 *Brassica campestris*, *Medicago sativa*, dan *Trifolium repens*

Pada penelitian oleh Wei dan Pan (2010), dilakukan perbandingan remediasi PAHs menggunakan *Brassica campestris*, *Medicago sativa*, dan *Trifolium repens*. Efisiensi *removal* dapat dilihat pada Tabel 3.13.

Tabel 3.13 Efisiensi Remediasi PAHs menggunakan *Brassica campestris*, *Medicago sativa* dan *Trifolium repens*

Tumbuhan	PAHs	
	Phenanthrene (Phe)	Pyrene (Pyr)
<i>Brassica campestris</i>	31,02%	27,32%
<i>Medicago sativa</i>	65,08%	51,92%
<i>Trifolium repens</i>	62,67%	54,36%
<i>Brassica campestris</i> dan <i>Medicago sativa</i>	75,88%	65,15%
<i>Brassica campestris</i> dan <i>Trifolium repens</i>	72,46%	67,27%

Sumber: Wei dan Pan, 2010

Hasil penelitian menunjukkan remediasi PAHs lebih efektif menggunakan tumbuhan campuran dibandingkan individual. Hal ini juga dibuktikan oleh Pan dkk. (2014) yang mendapatkan *removal* yang lebih besar ketika menggunakan tumbuhan campuran. Selain itu, penggunaan tumbuhan campuran bisa

mengurangi akumulasi PAHs pada tumbuhan sehingga dapat menurunkan potensi risiko ekologi.

3.5.4 *Sedum alfredii* dengan *Lolium perenne* atau *Ricinus communis*

Pada penelitian yang dilakukan oleh Wang dkk. (2013), konsentrasi Cd pada tunas *Sedum alfredii* menurun sebesar 64,3% dan 47,4% pada kombinasi *Sedum alfredii* dengan *Lolium perenne* (S-R) dan *Sedum alfredii* dengan *Ricinus communis* (S-C) jika dibandingkan dengan penanaman individu. Sebaliknya, konsentrasi Zn pada tunas *Sedum alfredii* meningkat 19,8% pada S-R dan 25,6% pada S-C dibandingkan dengan penanaman individu. Begitu pula pada timah yang lebih besar konsentrasinya pada penanaman campuran. Namun tidak terdapat perbedaan konsentrasi yang besar pada akar *Sedum alfredii*.

Remediasi Pyr lebih tinggi 2,3% pada S-R dan 3,5% pada S-C dibandingkan kontrol. Remediasi Ant lebih tinggi 8,5% pada S-R dan 9,1% pada S-C dibandingkan kontrol. Sedangkan pada Phe, hasil tidak berbeda jauh. Pada penelitian ini, sistem akar tumbuhan campuran berkembang lebih baik dibandingkan pada tumbuhan individu. Hal ini membuat pertumbuhan mikroba pada akar lebih baik dan menghasilkan hasil yang lebih tinggi pada remediasi Pyr dan Ant.

3.5.5 *Medicago sativa* L. dengan *Festuca arundinacea*

Pada penelitian yang dilakukan oleh Li dkk. (2013), digunakan tumbuhan *Medicago sativa* L. dengan *Festuca arundinacea* untuk remediasi tanah tercemar PCB. Penyisihan PCB dapat dilihat pada Tabel 3.14.

Tabel 3.14 Penyisihan PCB oleh *Medicago sativa* L. dan *Festuca arundinacea*

Tumbuhan	Penyisihan PCB (%)
<i>Medicago sativa</i> L.	30,6
<i>Festuca arundinacea</i>	39,6
<i>Medicago sativa</i> L. dan <i>Festuca arundinacea</i>	32,7

Sumber: Li dkk., 2013

Hasil penelitian ini sesuai dengan penelitian terdahulu yang menemukan bahwa kemampuan *Festuca arundinacea* dalam meremediasi lebih baik dibandingkan *Medicago sativa* L. Akan tetapi, jumlah total bakteri ditemukan lebih tinggi pada kondisi campuran. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi campuran menguntungkan bagi kondisi bakteri.

3.5.6 Penggunaan *Mixed Plants* pada Remediasi Tanah Tercemar Lindi TPA

Penggunaan tumbuhan campuran bisa menghasilkan hasil yang lebih baik dibandingkan pada penggunaan individu, terutama pada tanah dengan kontaminan yang beragam. Tumbuhan hiperakumulator, misalnya, hanya bisa mengakumulasi unsur spesifik, mengindikasikan keterbatasan aplikasi pada kondisi lapangan dengan berbagai macam kontaminan (McIntyre, 2003). Hal ini menunjukkan potensi dari penggunaan kondisi campuran untuk remediasi tanah tercemar lindi, yang mengandung kontaminan organik maupun anorganik. Penggunaan tumbuhan hiperakumulator dapat digunakan untuk remediasi logam berat yang terkandung di lindi dan bisa dikombinasikan dengan tumbuhan lain untuk meremediasi kontaminan lain yang terkandung pada lindi. Pemilihan spesies tumbuhan sangat penting dalam fitoremediasi, namun tidak cukup untuk bisa menghilangkan polutan dari tanah secara efektif. Faktor lain seperti karakteristik tanah dan ketersediaan nutrisi, yang mempunyai pengaruh besar terhadap tumbuhan dan pertumbuhan bakteri, juga mempunyai peran yang penting (Li dkk., 2013).

Dari contoh penggunaan tumbuhan campuran dalam fitoremediasi, diketahui penggunaan tumbuhan campuran juga bisa menurunkan efisiensi dibanding tumbuhan individu. Pada penelitian oleh Chen dkk. (2009) menunjukkan adanya hambatan pertumbuhan *Arabis flagellosa* di kondisi campuran dibandingkan dengan kondisi individu, yang disebabkan oleh kurangnya paparan sinar matahari yang didapatkan akibat daun *Athyrium yokoscense*. Hal ini menunjukkan pentingnya sistem operasional untuk mendukung sistem campuran dalam fitoremediasi.

Sedangkan pada penelitian oleh Li dkk. (2013), didapatkan penggunaan tumbuhan campuran menghasilkan efisiensi yang lebih rendah dibandingkan *Festuca arundinacea* secara individu. Namun, pada sistem campuran ditemukan jumlah bakteri yang lebih banyak di akar. Bakteri pada akar akan mendegradasi kontaminan organik dengan tumbuhan sebagai sumber karbon. Sementara, bakteri akan mendukung tumbuhan agar bisa hidup di tanah tercemar dan meningkatkan pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan (Khan dkk., 2013).

Adapun mekanisme fitoremediasi menggunakan tumbuhan campuran sebenarnya sama dengan penggunaan tumbuhan individu. Namun pada tumbuhan campuran, terjadi interaksi antar tumbuhan yang menentukan keberhasilan penggunaannya. Menurut Forrester dkk. (2006) terdapat 3 jenis interaksi pada penggunaan *mixed plants*, yaitu kompetisi, kompetisi reduksi, dan fasilitasi. Kompetisi biasanya terhadap cahaya dan nutrisi di dalam tanah. Terdapat kompetisi interspesies dan intraspesies. Jika keduanya sama besar bagi semua jenis tumbuhan yang digunakan, bisa menggunakan satu jenis saja karena hasilnya akan tidak berbeda jauh. Jika interspesies satu jenis lebih besar, sedangkan sebaliknya pada jenis lain maka akan terjadi tumbuhan yang mendapatkan sumber daya lebih banyak akan lebih baik pada *mixed*. Sedangkan spesies yang mendapatkan lebih sedikit akan mengalami perlambatan. Jika interspesies lebih besar bagi semua jenis tumbuhan, maka semuanya akan mempunyai ukuran lebih kecil pada *mixed plants*. Jika interspesies lebih kecil bagi semua jenis, maka semua tumbuhan akan mempunyai ukuran yang lebih besar pada *mixed*. Penelitian Chen dkk. (2009) termasuk pada interaksi kompetisi, dimana terjadi kompetisi terhadap paparan cahaya.

Kompetisi reduksi terhadap cahaya di bagian atas permukaan tanah dan nutrisi di dalam tanah. *Mixed plants* yang berhasil, menggunakan kanopi yang terstratifikasi. Bagian atas kanopi menggunakan tumbuhan yang tidak toleran bayangan dan memiliki pertumbuhan yang cepat. Sedangkan bagian bawah menggunakan spesies yang toleran terhadap bayangan. Stratifikasi kanopi ini bisa menghasilkan efisiensi penggunaan cahaya yang lebih pada kanopi atas dan tangkapan cahaya yang

lebih tinggi. Sedangkan kompetisi reduksi di bawah permukaan tanah terjadi melalui stratifikasi akar secara fisik dan kimia. Stratifikasi kimia bisa terjadi ketika terdapat spesies bantuan yang memiliki strategi berbeda dalam mendapatkan nutrisi. Stratifikasi ini terjadi ketika spesies tumbuhan yang berbeda berinteraksi dengan jenis mikroba tanah yang berbeda. Stratifikasi fisik terjadi melalui distribusi akar halus yang berbeda dan mempengaruhi strategi eksploitasi.

Fasilitasi bisa terjadi secara langsung melalui perbaikan kondisi lingkungan atau peningkatan ketersediaan sumber daya. Fasilitasi juga bisa terjadi secara tidak langsung dengan eliminasi kompetitor potensial, pengenalan organisme yang menguntungkan (mikroba tanah), atau perlindungan dari herbivora. Fasilitasi terjadi ketika satu spesies mempunyai efek positif bagi spesies lainnya. Dengan adanya tiga jenis interaksi tersebut, maka perlunya kajian operasional dan penelitian dengan skala laboratorium atau *greenhouse* sebelum aplikasi di lapangan.

Selain itu, pemilihan tumbuhan dalam sistem campuran juga harus memperhatikan jenis kontaminan dan kedalaman pencemaran. Diketahui dari sub bab 3.1 bahwa lindi dapat menyebar di tanah hingga kedalaman 20 meter dan jarak 410 meter dari lokasi TPA. Untuk pencemaran tanah oleh lindi dengan kedalaman kurang dari 5 meter, penggunaan jenis herba atau rerumputan sudah cukup. Rumput vetiver misalnya, mempunyai perakaran yang mencapai 5,2 meter sehingga mampu menjangkau lindi. Pemilihan jenis mengacu pada jenis dan konsentrasi kontaminan dan dibandingkan dengan kemampuan tumbuhan seperti pada Tabel 3.12.

Pada pencemaran tanah oleh lindi dengan kedalaman lebih dari 5 meter, penggunaan pepohonan sangat diperlukan. Pepohonan memiliki perakaran yang lebih panjang sehingga diharapkan mampu mencapai lindi. Hal ini menunjukkan salah satu kelemahan fitoremediasi dimana akar tumbuhan harus mampu menjangkau kontaminan. Akan tetapi, laju pertumbuhan pepohonan tergolong lebih lambat jika dibandingkan dengan tumbuhan perdu ataupun herba. Sehingga diperlukan adanya

tumbuhan lain untuk menyerap kontaminan dengan cepat, di samping sebagai *phytocapping*. Laju pertumbuhan yang cepat diharapkan sebanding dengan laju penyerapan kontaminan yang ada dalam tanah. Sebagai kombinasi, dapat digunakan vetiver, *Cyperus*, atau alfalfa. Rumput mempunyai perakaran serabut, dimana akan menjadi penutup luasan tanah yang tercemar. Selain itu, rumput akan menyerap air hujan sehingga mengurangi pergerakan lindi di tanah.

Pepohonan yang umum digunakan dalam fitoremediasi yaitu *willow*, *poplar*, dan *Eucalyptus*. Namun *willow* maupun *poplar* bukan merupakan spesies tropis, sehingga penggunaannya mungkin tidak bisa pada daerah tropis seperti Indonesia. Jenis pepohonan menjadi terbatas pada kontaminan tertentu. *Eucalyptus* misalnya baru diketahui untuk jenis kontaminan Cd, Zn, Cr, Pb, dan Se. Jenis lain yaitu jarak pagar untuk kontaminan Hg. Sehingga kontaminan lain pada kedalaman lebih dari 5 meter harus dicari jenis pepohonan yang dapat menyerap kontaminan tersebut.

Salah satu kelemahan fitoremediasi yaitu akar harus bisa mencapai kedalaman pencemaran. Alternatif yang bisa digunakan apabila kedalaman pencemaran sangat jauh dari panjang akar tumbuhan adalah dengan melakukan pengolahan *ex-situ*. Pertama tanah yang tercemar digali hingga kedalaman pencemaran yang terdeteksi. Lalu dilakukan penanaman di tempat lain dengan kedalaman hanya sekitar 5 meter sehingga mampu diserap oleh jenis tumbuhan seperti herba atau rerumputan. Namun metode ini memerlukan lahan yang luas dan biaya tambahan untuk penggalian dan pengembalian tanah kembali (jika dilakukan). Sehingga perlu adanya kajian mengenai biaya operasional untuk memastikan bahwa penggunaannya masih ekonomis.

Namun jika terdapat jenis tumbuhan yang sesuai dengan jenis dan konsentrasi kontaminan serta kedalaman pencemaran, sebaiknya remediasi dilakukan secara *in-situ*. Tumbuhan ditanam di lokasi pencemaran di TPA. Tumbuhan juga bisa ditanam pada daerah penyangga yang merupakan bagian dari fasilitas perlindungan lingkungan pada TPA, dengan tujuan mencegah

atau mengurai penyebaran lindi hingga keluar TPA. Menurut Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 3 tahun 2013 tentang Penyelenggaraan Prasarana dan Sarana Persampahan dalam Penanganan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga, daerah penyangga dapat berfungsi untuk mengurangi dampak negatif yang ditimbulkan oleh kegiatan pembuangan akhir sampah terhadap lingkungan sekitarnya.

Pada studi ini, remediasi akan dilakukan pada sekitar area penimbunan sampah. Area penimbunan tidak cocok dilakukan remediasi menggunakan tumbuhan. Penimbunan dengan sel galian misalnya, dengan kedalaman mencapai 15 meter maka hanya bisa digunakan pepohonan untuk mencapai dasar tanah asli yang tercemar. Hal ini menjadi kelemahan dalam fitoremediasi dimana akar tumbuhan harus mencapai pencemar. Untuk itu, perlu diperhatikan kedalaman penimbunan sampah apabila akan meremediasi area penimbunan sampah dengan tumbuhan. Kedalaman penimbunan yang masih bisa dilakukan remediasi menggunakan tumbuhan adalah sekitar 15 meter. Hal ini memungkinkan beberapa jenis tumbuhan untuk mencapai pencemar.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

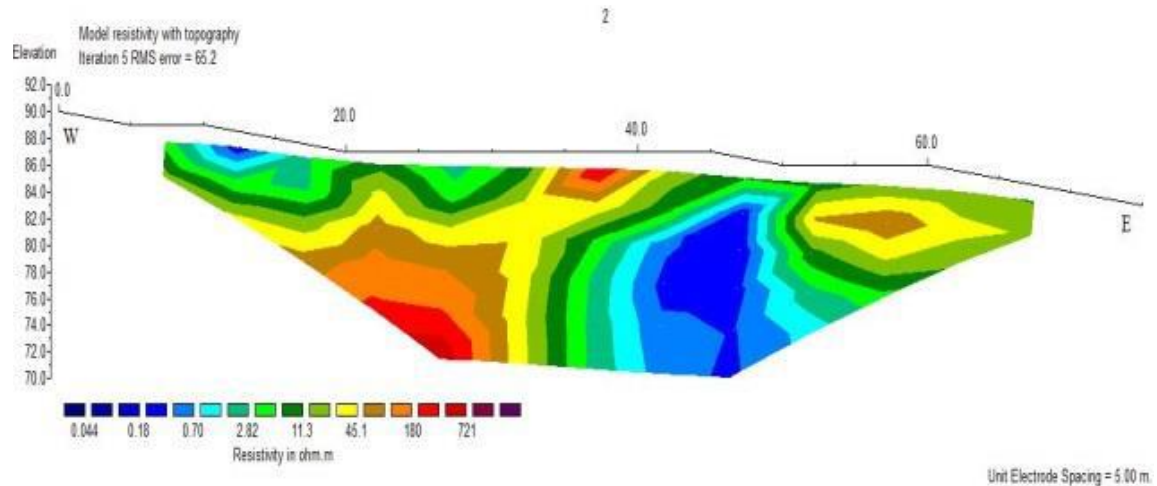
STUDI KASUS

4.1 Studi Kasus

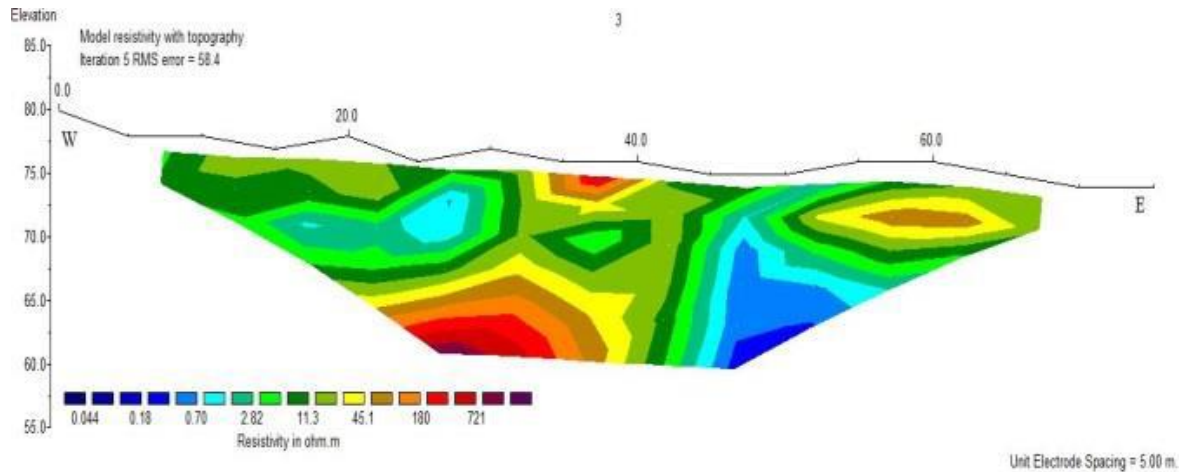
Studi kasus yang digunakan adalah pada TPA Jatibarang, Semarang. TPA Jatibarang terletak di Kelurahan Kedungpane, Kecamatan Mijen, Kota Semarang. TPA ini memiliki luas lahan 46,183 Ha: 27,7098 Ha (60%) untuk lahan buang dan 18,4732 Ha (40%) untuk infrastruktur kolam lindi (*leachate*), sabuk hijau, dan lahan cover (Ulfah dan Dewi, 2015). TPA Jatibarang merupakan daerah berbukit dengan kemiringan lahan lebih dari 24% dan ketinggian bervariasi antara 65 – 200 meter di atas permukaan laut (Oktiawan, 2008).

TPA Jatibarang belum menerapkan sistem *sanitary landfill* sepenuhnya, sehingga menyebabkan pencemaran oleh lindi yang dihasilkan. Wulandari dkk. (2015) meneliti pola persebaran lindi pada tanah di TPA Jatibarang dengan menggunakan metode geolistrik. Tiga dari lima lintasan pengambilan data berada pada lokasi TPA. Pada ketiga lintasan, cairan lindi memiliki resistivitas 0,044 Ω m – 0,7 Ω m (berwarna biru tua). Pada Gambar 4.1, dapat dilihat bahwa lindi menyebar pada bentangan 5 – 15 m pada elevasi 89,5 – 85 m dan bentangan 35 – 60 m pada elevasi 88 – 70 m. Sehingga dapat disimpulkan lindi menyebar hingga kedalaman 18 meter dari permukaan tanah.

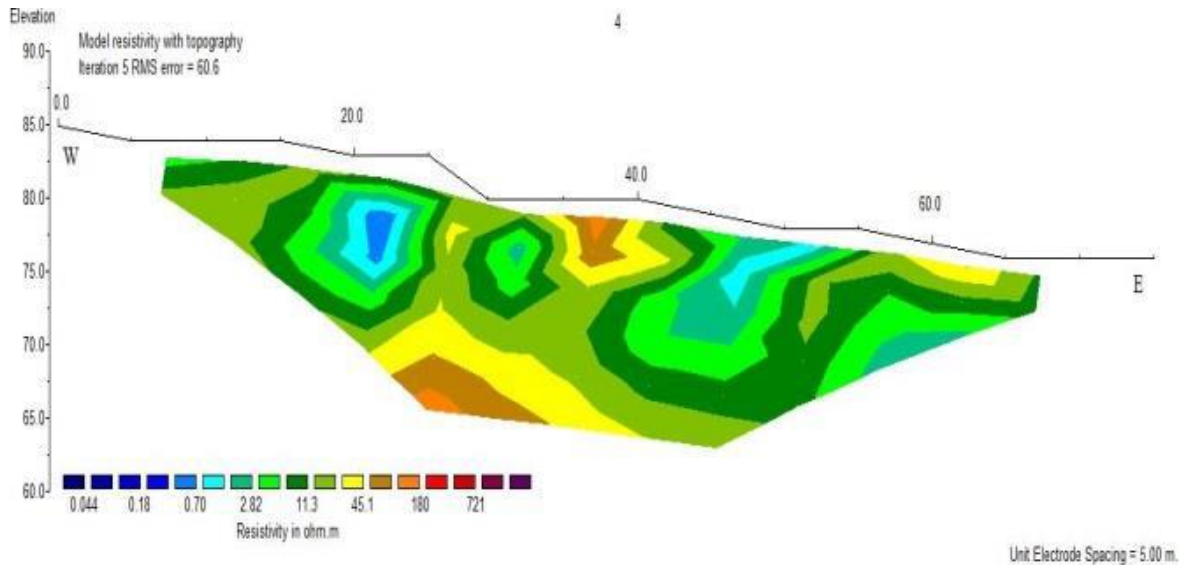
Pada lintasan 2 (Gambar 4.2), dapat dilihat bahwa lindi menyebar pada bentangan 15 – 30 m pada elevasi 75 – 67,5 m dan bentangan 35 – 40 m pada elevasi 75 – 60 m. Sehingga dapat disimpulkan lindi menyebar hingga kedalaman 7,5 meter dari permukaan tanah. Pada lintasan 3 (Gambar 4.3,, dapat dilihat bahwa lindi menyebar pada bentangan 17,5 – 27,5 m pada elevasi 82,5 – 75 m; bentangan 30 – 35 m pada elevasi 80 – 77,5 m; dan bentangan 40 – 65 m pada elevasi 82,5 – 67,5 m. Sehingga dapat disimpulkan lindi menyebar hingga kedalaman 15 meter dari permukaan tanah. Peta lokasi TPA Jatibarang dapat dilihat pada Gambar 4.4. Kualitas lindi TPA Jatibarang dapat dilihat pada Tabel 4.1.



Gambar 4.1 Penampang Resistivitas Tanah TPA Jatibarang lintasan 1
Sumber: Wulandari dkk., 2015



Gambar 4.2 Penampang Resistivitas Tanah TPA Jatibarang lintasan 2
Sumber: Wulandari dkk., 2015



Gambar 4.3 Penampang Resistivitas Tanah TPA Jatibarang lintasan 3
Sumber: Wulandari dkk., 2015



Gambar 4.4 Lokasi TPA Jatibarang

Sumber: Google Earth, 2017

Halaman ini sengaja dikosongkan

Tabel 4.1 Kualitas Lindi TPA Jatibarang

Parameter	Konsentrasi	Satuan
BOD ₅	1600	mg/l
COD	4000	mg/l
Kekeruhan	300	NTU
TSS	522	mg/l
Warna	1600,4	PtCo
pH	8,5	-
Suhu	28,7	°C

Sumber: Rezagama dkk., 2016

4.2 Kajian Tumbuhan untuk Studi Kasus

Pada studi kasus ini, akan dipilih jenis tanaman yang akan digunakan dalam meremediasi tanah TPA Jatibarang dengan sistem campuran. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Ulfah dan Dewi (2015), lahan TPA Jatibarang memiliki konsentrasi logam berat seperti pada Tabel 4.2. Logam berat ini masuk ke dalam tanah dari lindi yang merembes hingga jarak tertentu. Namun pada penelitian tersebut, sampel tanah yang digunakan hanya hingga pada kedalaman 20 cm. Sehingga konsentrasi logam berat pada berbagai kedalaman tanah tercemar (hingga 18 meter seperti yang dilaporkan oleh Wulandari dkk., 2015) bisa berbeda. Ini menjadi salah satu kajian yang perlu diperhatikan sebelum menggunakan proses fitoremediasi untuk meremediasi tanah tercemar lindi, dimana perlu adanya data konsentrasi berbagai parameter pencemar pada berbagai kedalaman tanah. Sehingga, pemilihan tumbuhan dapat dilakukan dengan tepat. Dengan keterbatasan data yang ada, pada studi kasus ini diasumsikan bahwa konsentrasi pencemar pada kedalaman 0 – 18 meter adalah sama.

Dilakukan perbandingan antara konsentrasi logam berat dengan nilai ambang yang terdapat pada Tabel 3.10. Melalui perbandingan ini, dapat dilihat jenis kontaminan yang melebihi nilai ambang dan akan menjadi acuan dalam pemilihan jenis tumbuhan yang akan digunakan.

Tabel 4.2 Perbandingan Konsentrasi Logam Berat di tanah TPA Jatibarang

Logam	Konsentrasi (mg/l) ⁵⁾		Nilai ambang dalam tanah (ppm)
	Lokasi 1	Lokasi 2	
Ag	-	0,017	
Be	0,027	0,034	
Bi	-	0,004	
Ca	194,3	-	
Cd	0,037	0,032	0,1 – 7 ¹⁾ 0,05 – 0,7 ²⁾ 0,1 – 1 ³⁾
Cr	0,375	0,23	20 ⁴⁾
Cu	1,084	1,325	2 – 100 ¹⁾ 1 – 300 ²⁾
Fe	267,4	285	
Ga	0,401	0,442	
Hg	2,2	2,587	0,01 – 0,3 ²⁾ 0,01 – 0,06 ³⁾
Mg	46,33	92,46	
Mn	14,69	44,7	100 – 4000 ¹⁾
Na	20,61	4,747	
Ni	0,214	0,195	10 – 1000 ¹⁾
Rb	24,43	23,31	
Se	0,114	1,11	0,4 ³⁾
U	192,6	188,1	
V	1,488	0,993	

Sumber: 1) Pickering (1980) dalam Erfandi dan Juarsah (2014)

2) Darmono (1995) dalam Ulfah dan Dewi (2015)

3) Ferguson (1990) dalam Ulfah dan Dewi (2015)

4) DPR-EGASPIN (2002) dalam Wuana dan Okiemen (2011)

5) Ulfah dan Dewi, 2015

Berdasarkan Tabel 4.2, diketahui bahwa logam berat yang melebihi nilai ambang adalah Hg dan Se, sedangkan yang tidak melebihi adalah Cd, Cr, Cu, Mn, dan Ni. Logam berat Ag, Be, Bi, Ca, Fe, Ga, Na, Rb, U, dan V belum terdapat nilai ambangnya sehingga tidak bisa disimpulkan apakah logam-logam tersebut mencemari tanah atau tidak. Selain itu, berdasarkan penelitian Oktawan dan Priambada (2008), lindi TPA Jatibarang juga

mengandung Mn dan Zn. Oleh karena itu, fokus logam berat yang akan diremediasi pada tanah TPA Jatibarang yaitu Hg dan Se.

Kontaminan Hg memiliki konsentrasi sebesar 2,2 dan 2,87 mg/l pada tanah TPA Jatibarang. Dengan menggunakan Tabel 3.11, vetiver dan jarak pagar dapat menyerap Hg dengan konsentrasi hingga sekitar 2,5 ppm dan 1 ppm. Sedangkan untuk kontaminan Se, dapat dilihat pada tabel 4.2 memiliki konsentrasi 0,114 dan 1,11 mg/l. Kembali menggunakan Tabel 3.11, remediasi Se dapat menggunakan alfalfa; vetiver; *Brassica*; *Astragalus*; atau *Eucalyptus* untuk konsentrasi berturut-turut hingga 10 ppm; 10 ppm; 1 ppm; 2 – 10 ppm; dan 5 ppm. Dikarenakan vetiver telah dipilih untuk meremediasi Hg, maka vetiver juga akan menjadi remediator untuk kontaminan Se.

Vetiver merupakan rerumputan yang memiliki pertumbuhan cepat, sehingga penyerapan lindi dalam tanah diharapkan cepat terserap. Rerumputan juga akan menjadi penutup tanah, dimana akan mengurangi pergerakan lindi di dalam tanah. Vetiver merupakan rumput yang tumbuh sepanjang tahun, tumbuh membentuk rumpun hingga ketinggian 1 – 3 meter dan diameter 2 – 8 mm. Daun vetiver berbentuk pita berwarna hijau dengan permukaan bawah daun licin dan tidak mengandung minyak. Batangnya tegak dan kaku, dapat berdiri pada kedalaman air yang relatif dalam. Warna batangnya putih dengan ruas-ruas di sekeliling batang. Bunga vetiver tumbuh di ujung batang dan bulir yang berbentuk menyerupai padi dan berwarna putih kotor. Akarnya bercabang-cabang, tidak memiliki stolon, sistem akar serabut dalam, berwarna kuning, dan beraroma harum. Kedalaman akar bisa mencapai 3 – 4 meter pada tahun pertama, dan bisa tumbuh panjang hingga mencapai 5,2 meter (Aryanto, 2012; Falahiyah, 2014).

Vetiver dapat ditanam sepanjang tahun, namun waktu terbaik adalah ketika musim penghujan. Bibit vetiver didapat dengan pengembangbiakan vegetatif, yaitu memisahkan anakan dengan rumpun utama. Pemangkasan daun dilakukan setelah tanaman berumur kurang lebih 6 bulan. Vetiver dipanen pada umur sekitar 12 – 14 bulan. Pemanenan dilakukan dengan cara membongkar akarnya, tanah dicangkul agar akar tidak terputus,

lalu akar dipotong pada bagian bawah bonggolnya (Falahiyah, 2014).

Dengan pencemaran lindi yang mencapai kedalaman 18 m, maka akan digunakan pepohonan sebagai salah satu jenis tumbuhan. Untuk itu, digunakan jenis pepohonan untuk remediasi yaitu jarak pagar untuk kontaminan Hg dan *Eucalyptus* untuk kontaminan Se. Jarak pagar merupakan tanaman perdu yang berasal dari Amerika Tengah dan Meksiko, menyebar hingga ke Afrika dan Asia. Tanaman ini tersebar hampir di seluruh wilayah Indonesia. Jarak pagar memiliki tinggi 1 – 7 meter dan bercabang tidak teratur. Batangnya berkayu dan silindris, apabila terluka akan mengeluarkan getah. Daunnya tunggal berlekuk dan bersudut 3 atau 5. Warna daun hijau dengan bagian bawah lebih pucat dibandingkan permukaan atas. Bunga jarak pagar merupakan bungai majemuk berbentuk malai, berwarna kuning kehijauan, berkelamin tunggal, dan berumah satu (putik dan benang sari dalam satu tanaman).

Bibit jarak pagar sebaiknya berasal dari biji, karena akan memiliki akar tunggang sehingga kedalaman akar lebih dalam dibandingkan dengan bibit stek. Pada akhir tahun pertama, dilakukan pemangkasan dengan memotong tanaman hingga setinggi 30 cm dari permukaan tanah. Pada tahun kedua dan berikutnya dilakukan dengan memotong cabang tanaman sepanjang dua per tiga bagian. Buah tanaman jarak pagar bisa mulai dipanen setelah 4 – 6 tahun setelah tanam. Buah yang bisa dipanen ditandai dengan kulit berwarna kuning (Hambali dkk., 2006; Tjahjana dan Pranowo, 2010; Cholid, 2015).

Eucalyptus atau leda termasuk dalam famili *Myrtaceae*. Pohon *Eucalyptus* bisa mencapai tinggi 100 meter dengan batang bulat, lurus, dan sedikit cabang. Daunnya berbentuk lanset hingga bulat memanjang dan bagian ujungnya runcing membentuk kait. Pada pohon muda, daun terletak berhadapan dan ukurannya berbeda-beda serta lebih besar dibanding pohon yang tua. Pada pohon yang sudah tua, letak daunnya berselang-seling. *Eucalyptus* merupakan tanaman yang cepat tumbuh, terutama di daerah yang banyak air seperti di pinggir sungai dan danau. *Eucalyptus* dapat tumbuh baik pada dataran rendah

hingga tinggi (0 – 1800 meter di atas permukaan laut), dengan curah hujan 2000 – 5000 mm per tahun. *Eucalyptus* dapat tumbuh hingga 3 meter pada tahun pertama. Tanaman ini bisa dipanen pada usia 5 tahun dengan hasil kayu rata-rata per pohon minimal 0,7 m³ atau diameter batang 30 – 35 cm (Sinaga, 2017).



Gambar 4.5 Vetiver

Sumber: Oshunsanya dan Aliku, 2017



Gambar 4.6 Jarak Pagar

Sumber: Ulfah dan Dewi, 2015



Gambar 4.7 *Eucalyptus*

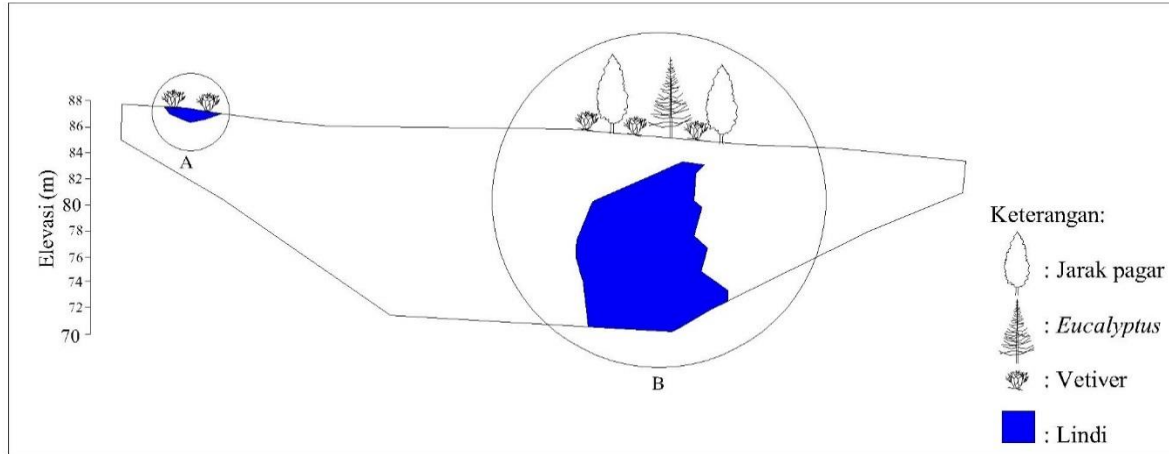
Sumber: HelloMojo, 2007

Ketiga tanaman terpilih kemudian akan ditanam pada area yang terkontaminasi, setelah dilakukan aklimatisasi sebelumnya. Jarak pagar memiliki jarak tanam 1 x 1 meter hingga 2 x 2 meter untuk monokultur dan 3 x 2 meter atau 4 x 2 meter untuk tumpang sari/multikultur (Cholid, 2015). Berdasarkan jarak tanam ini, maka bisa digunakan jarak 3 x 2 meter antar pohon jarak pagar dan *Eucalyptus*. Jarak antar *Eucalyptus* dan jarak pagar bisa ditanami dengan vetiver di antaranya. Hal ini bertujuan agar seluruh area yang terkontaminasi tertutupi oleh tanaman secara merata. Perlu dilakukan kajian lebih lanjut untuk menentukan proporsi tanaman serta jarak tanam. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan optimum dari parameter tersebut dalam menyerap kontaminan.

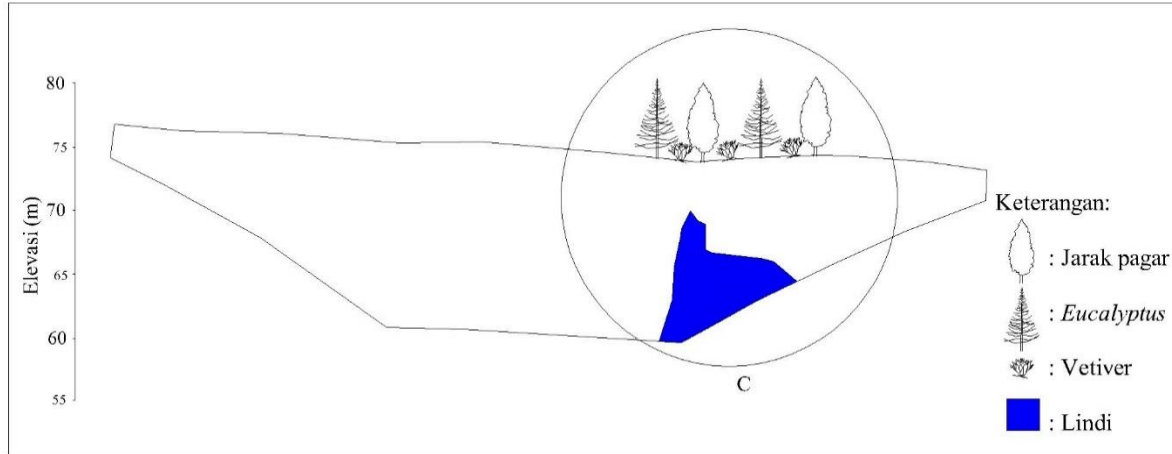
Penanaman ketiga tumbuhan ini dilakukan pada area yang terkontaminasi atau sedekat mungkin. Sehingga kontaminan yang berada dalam tanah bisa dijangkau oleh akar ketiga tanaman tersebut. Akan tetapi tidak ditemukan data lokasi yang tercemar oleh lindi dan kedalaman pencemarannya, sehingga hanya bisa disarankan penanaman dilakukan pada dan/atau di dekat tumpukan sampah dan daerah penyangga. Perencanaan penanaman disesuaikan dengan kedalaman pencemaran. Pada lintasan 1 (Gambar 4.8) misalnya, terdapat 2 lokasi titik pencemaran dengan kedalaman yang berbeda. Titik di sebelah kiri memiliki kedalaman kurang dari 5 meter, sehingga

penggunaan vetiver sudah cukup karena mampu menyerap logam Hg maupun Se. Namun dengan tujuan menaikkan efisiensi, penambahan jarak pagar dan *Eucalyptus* sebaiknya dilakukan. Sedangkan pada lokasi pencemaran di sebelah kanan, perlu menggunakan ketiga jenis tumbuhan. Hal ini disebabkan karena pencemaran yang lebih dari 5 meter. Hal serupa juga dilakukan pada lintasan 2 (Gambar 4.9) dan 3 (Gambar 4.10).

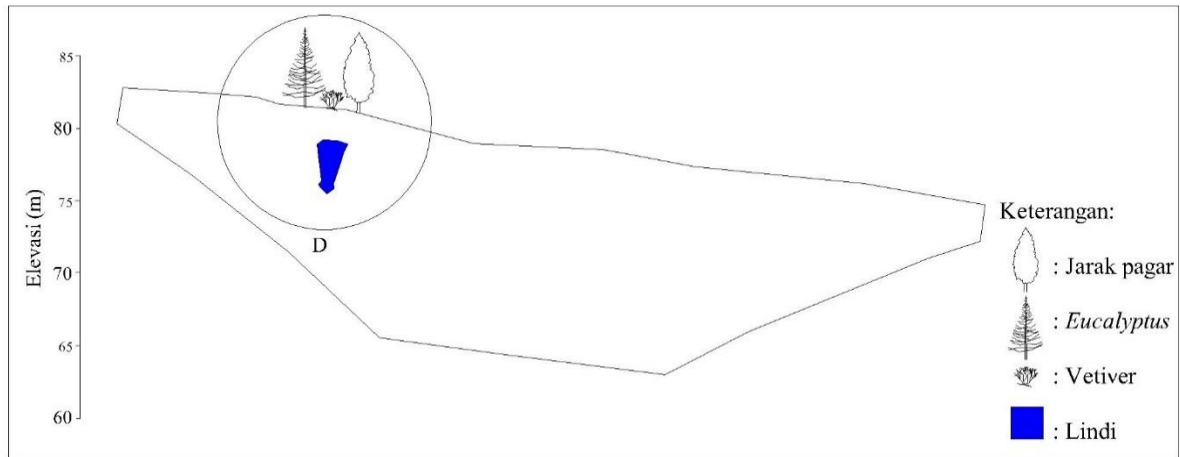
Adapun remediasi dilakukan hingga tanah tidak lagi tercemar. Tanah yang sehat atau berkualitas bisa didefinisikan sebagai kemampuan tanah untuk melakukan tugasnya atau seberapa baik tanah berfungsi untuk tujuan tertentu. Biasanya, karakteristik fisik (seperti tekstur, densitas, porositas, dan kemampuan menahan air) dan kimia (seperti pH, kandungan senyawa organik, unsur utama, dan logam berat) menjadi indikator yang sering digunakan untuk menentukan kualitas tanah (Gomez-Sagasti dkk., 2012). Karakteristik tanah ini kemudian dibandingkan dengan nilai ambang batas kontaminan atau dengan tanah yang tidak tercemar di sekitar lokasi untuk menentukan kualitas tanah yang telah diremediasi.



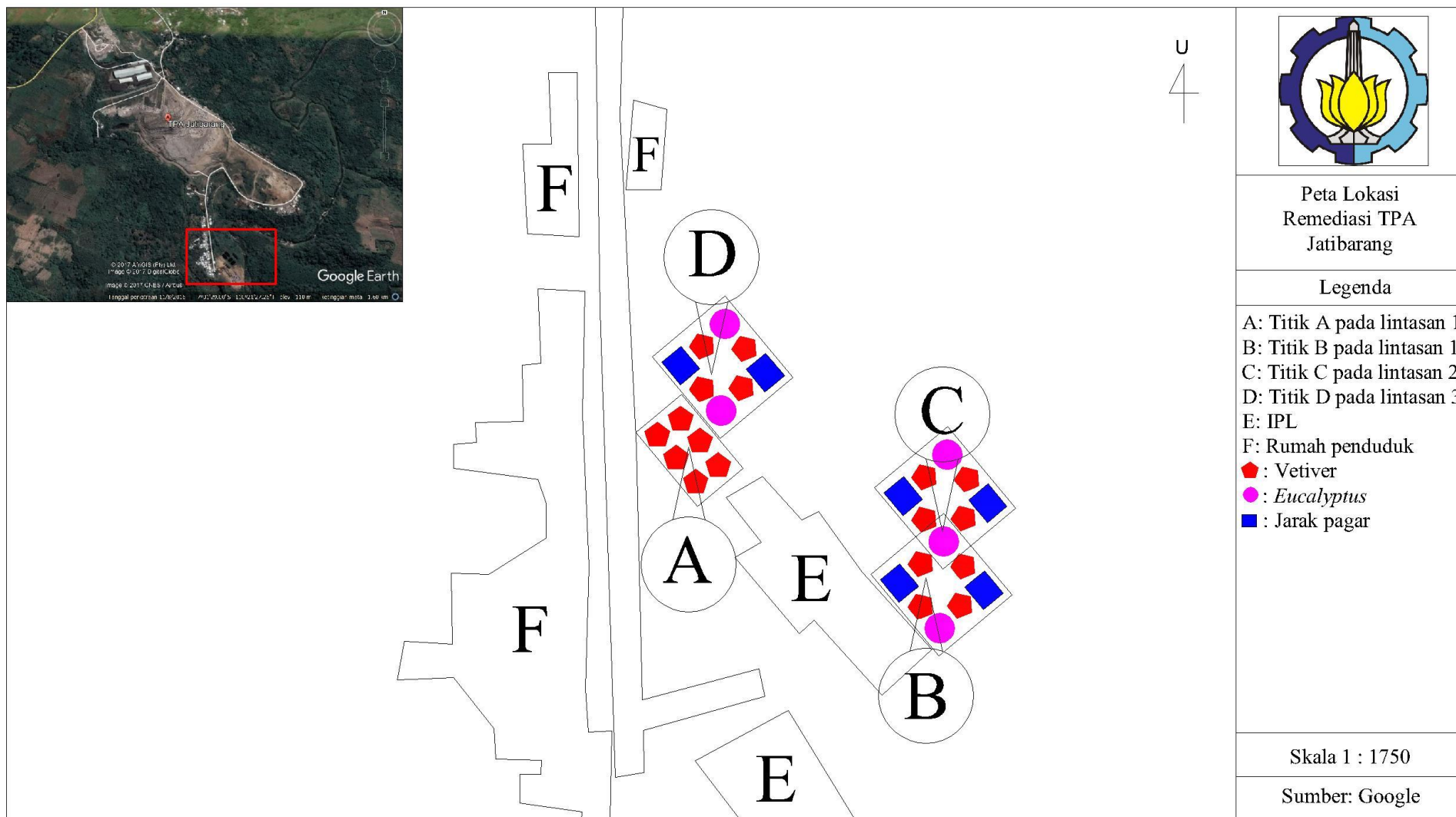
Gambar 4.8 Rencana Remediasi pada Lintasan 1



Gambar 4.9 Rencana Remediasi pada Lintasan 2



Gambar 4.10 Rencana Remediasi pada Lintasan 3



Gambar 4.11 Peta Lokasi Remediasi TPA Jatibarang

Sumber: Google Earth, 2017 dan Hasil analisis

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari studi literatur ini adalah sebagai berikut:

1. Berbagai kelompok jenis tumbuhan dapat digunakan untuk remediasi tanah tercemar lindi, misalnya rerumputan seperti vetiver dan alfalfa yang mampu meremediasi berbagai kontaminan organik dan anorganik serta pepohonan seperti jarak pagar dan *Eucalyptus* yang mampu meremediasi berbagai logam yang terkandung di tanah tercemar lindi.
2. Tanah tercemar lindi dapat mengandung berbagai macam kontaminan. Penggunaan *mixed plants* akan meningkatkan efesiensi remediasi. Faktor yang perlu dipertimbangkan dalam penggunaan *mixed plants* antara lain jenis kontaminan dan sistem operasional.

5.2 Saran

Saran dari studi literatur ini adalah:

1. Perlu adanya data berbagai konsentrasi kontaminan pada berbagai kedalaman tanah untuk memilih jenis tumbuhan yang akan digunakan.
2. Perlu adanya kajian atau penelitian mengenai sistem operasional yang akan digunakan untuk remediasi tanah tercemar lindi TPA menggunakan *mixed plants* seperti jarak tanam, kerapatan, dan proporsi tumbuhan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullahi, M.S. 2015. *Soil Contamination, Remediation and Plants: Prospects and Challenges* in Hakeem, K., Sabir, M., Ozturk, M., dan Murmet, A. (Ed.). 2015. *Soil Remediation and Plants: Prospects and Challenges*. United States of America: Elsvier.
- Alaydrus, Alfina Taurida. 2010. *Penentuan Penyebaran Lindi pada Bawah Permukaan dengan Metode Geolistrik di TPA Kebon Kongok, Gerung, Lombok Barat, NTB*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Ali, Munawar. 2011. *Rembesan Air Lindi (Leachate) Dampak pada Tanaman Pangan dan Kesehatan*. Surabaya: UPN Press.
- Allen, C.E., Borazjani, H., dan Diehl, S. 2002. *The Phytoremediation of Creosote Contaminated Soil*. United States of America: Department of Forest Products, Mississippi State University.
- Anonim. 2003. *Case Histories: Ponds, Lakes, Canals or River Remediation with Bioaugmentation*, <URL: http://www.environmentallevage.com/Soil_Remediation_Case_histories.htm>
- Anonim. 2008. *Arabis flagellosa*, <URL: http://www7a.biglobe.ne.jp/~flower_world/Brassicaceae/Arabis%20flagellosa.htm>
- Antiochia, R., Campanella, L., Ghezzi, P., dan Movassaghi, K. 2007. *The Use of Vetiver for Remediation of Heavy Metal Soil Contamination*. Analytical and Bioanalytical Chemistry Volume 338(4): 947-956.
- Aryanto. 2012. *Vetiver Rumput Perkasa Penahan Erosi*, <URL: <http://litbang.pu.go.id/arsip/vetiver-rumput-perkasa-penahan-erosi/>>
- Banuelos, G.S., Tebbets, J.S., Johnson, J.A., Vail, P.V., dan Mackey, B. 1999. *Insect Diversity in Phytoremediation and*

Bioaccumulation of Se. International Journal of Phytoremediation Volume 1(4): 311-326.

Basumatary, B., Saikia, R., Bordoloi, S., Das, H.C., dan Sarma, H.P. 2012. *Assessment of Potential Plant Species for Phytoremediation of Hydrocarbon-Contaminated Areas of Upper Assam, India*. Journal of Chemical Technology and Biotechnology Volume 87(9): 1329-1334.

Basumatary, B., Saikia, R., dan Bordoloi, S. 2012. *Phytoremediation of Crude Oil Contaminated Soil using Nut Grass, Cyperus rotundus*. Journal of Environmental Biology Volume 33(5): 891-896.

Bilal, H., Ali, S.S., dan Kim, K. 2014. *Potential of Eucalyptus in the Remediation of Environmental Problem: A Review*. International Journal of Innovation and Scientific Research Volume 4(2): 136-144.

Bolan, N.S., Park, J.H., Robinson, B., Naidu, R., dan Huh, K.Y. 2011. *Phytostabilization: A Green Approach to Contaminant Containment in Advances in Agronomy* Volume 112. Maryland Heights, MO, United States: Academic Press.

Bouzayani, F., Aydi, A., dan Abichou, T. 2014. *Soil Contamination by Heavy Metals in Landfills: Measurements from an Unlined Leachate Storage Basin*. Environment Monitoring Assessment Volume 186(8): 5033-5040.

Ceppa, Clara. 2011. *Alternative Farming Systems, Biotechnology, Drought Stress and Ecological Fertilisation* in Lichtfouse, Eric. *Alternative Farming Systems, Biotechnology, Drought Stress and Ecological Fertilisation*. Springer Science & Business Media: Netherlands.

Chen, Z., Setagawa, M., Kang, Y., Sakurai, K., Aikawa, Y., dan Iwasaki, K. 2009. *Zinc and Cadmium Uptake from a Metalliferous Soil by a Mixed Culture *Athyrium yokoscense* and *Arabis flagellosa**. Soil Science and Plant Nutrition Volume 55(2): 315-324.

- Cholid, Mohammad. 2015. *Budidaya Jarak Pagar (Jatropha curcas Linn.)*, <URL: https://www.researchgate.net/publication/272631584_Budidaya_jarak_pagar>
- Christ, H. 2010. *Athyrium yokoscense in Japan, Honshu, Nikko Botanical Garden, June 2010*, <URL: <http://www.asianflora.com/Pterydophytes/Athyrium-yokoscense.htm>>
- Dahn, L.T., Truong, P., Mammucari, R., Tran, T., dan Foster, N. 2009. *Vetiver Grass, Vetiveria zizanioides: A Choice Plant for Phytoremediation of Heavy Metals and Organic Wastes*. International Journal of Phytoremediation Volume 11(8): 664-691.
- Daniel, V.N., Nimyel, N.D., Daniang, I.E. 2012. *The Potential of Eucalyptus camaldulensis for the Phytoextraction of Six Heavy Metals in Tin-mined Soils of Barkin Ladi L.G.A. of Plateau State, Nigeria*. International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) Volume 2(2): 346-349.
- Darmayanti, L., Yusa, M., dan RA, Esther. 2011. *Identifikasi Tanah Tercemar Lindi Tempat Pembuangan Akhir Sampah Muara Fajar dengan Metode Geolistrik*. Jurnal Bumi Lestari Volume 11(2): 371-378.
- Darwati, Sri. 2009. *Potensi Rehabilitasi Tempat Pemrosesan Akhir Sampah melalui Penambangan Lahan Urug*. Jurnal Permukiman Volume 4(1): 29-37.
- Deswita, Y., Sudiar, N.Y., Mufit, F., dan Akmam. 2015. *Penerapan Metode Geolistrik Tahanan Jenis Konfigurasi Wenner untuk Menentukan Penyebaran Lindi di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Sampah Air Dingin Kota Padang*. Pillar of Physics Volume 5: 97-104.
- Dhillon, K.S., Dhillon, S.K., dan Thind, H.S. 2008. *Evaluation of Different Agroforestry Tree Species for Their Sustainability in the Phytoremediation of Seleniferous Soils*. Soil Use and Management Volume 24(2): 208-216.

- Douglas, G.B., McIvor, I.R., dan Llyod-West, C.M. 2016. *Early Root Development of Field-Grown Poplar: Effects of Planting Material and Genotype*. New Zealand Journal of Forestry Science Volume 46(1).
- Dushenkov, V., Kumar, P.B.A.N., Motto, H., dan Raskin, I. 1995. *Rhizofiltration: The Use of Plants To Remove Heavy Metals from Aqueous Streams*. Environmental Science and Technology Volume 29(5): 1239-1245.
- Elektorowicz, M. dan Keropian, Z. 2015. *Lithium, Vanadium and Chromium Uptake Ability of Brassica juncea from Lithium Mine Tailings*. International of Phytoremediation Volume 17(1-6): 521-528.
- Erfandi, Deddy dan Juarsah, Ishak. 2014. Teknologi Pengendalian Pencemaran Logam Berat pada Lahan Pertanian dalam Agus, F., Subardja, D., dan Soelaeman, Y. 2014. *Konservasi Tanah Menghadapi Perubahan Iklim*. Jakarta: IAARD Press.
- Falahiyah, Arini. 2014. *Pertumbuhan dan Produksi Tanaman Akar Wangi (Vetiveria zizanioides L. Nash) secara Hidroponik pada Beberapa Media Tanam*. Skripsi. Institut Pertanian Bogor.
- Favas, P.J.C., Pratas, J., Varun, M., D'Souza, R., dan Paul, M.S. 2014. *Phytoremediation of Soil Contaminated with Metals and Metalloids at Mining Areas: Potential of Native Flora in Hernandez-Soriano, M.C. Environmental Risk Assessment of Soil Contamination*. InTech.
- Forrester, D.I., Bauhus, J., Cowie, A.L., dan Vanclay, J.K. 2006. *Mixed-species Plantation of Eucalyptus with Nitrogen Fixing Trees: A Review*. Forest Ecology and Management Volume 233(2-3): 211-230.
- Galko, Grzegorz. 2015. *The Influence of Infiltration of Leachate from Landfills on the Changes of Chemical Parameters of the Soil*. Journal of Ecological Engineering Volume 16(4): 198-205.

- Garbisu, Carlos dan Alkorta, Itziar. 2001. *Phytoextraction: A Cost-effective Plant-based Technology for the Removal of Metals from the Environment*. Bioresource Technology Volume 77(3): 229-236.
- Gardea-Torresdey, J.L., Gonzalez, J.H., Tiemann, K.J., Rodriguez, O., dan Gamez, G. 1998. *Phytofiltration of Hazardous Cadmium, Chromium, Lead and Zinc Ions by Biomass of Medicago sativa (Alfalfa)*. Journal of Hazardous Materials Volume 57(1-3): 29-39.
- George, Meril. 2014. *Studies on Landfill Leachate Transportation and Its Impact on Soil Characteristics*. India: Division of Civil Engineering, Cochin University of Science and Technology.
- Ghosh, M. dan Singh, S.P. 2005. *A Review on Phytoremediation of Heavy Metals and Utilization of It's by Products*. Asian Journal on Energy and Environment Volume 6(4): 214-231.
- Girija, N., Nair, M.M., Lakshmi, S., Pillai, S.S. 2016. *Phytoremediation Potential of Vetiver zizanioides: A Green Technology to Remove Pollutants from Pampa River by Hydroponic Technique*. Indian Journal of Advance in Chemical Science Volume 4(4): 464-468.
- Glenn, E.P., Jordan, F., dan Waugh, W.J. 2017. *Phytoremediation of a Nitrogen-contaminated Desert Soil by Native Shrubs and Microbial Process*. Land Degradation & Development Volume 28(1): 361-369.
- Gomez-Sagasti, M.T., Alkorta, I., Becerril, J.M., Epelde, L., Anza, M., dan Garbisu, C. 2012. *Microbial Monitoring of the Recovery of Soil Quality During Heavy Metal Phytoremediation*. Water Air Soil Pollut Volume 223: 3249-3262.
- Guan, S.P., Yu, Z.H., dan Zhong, S. 2014. *Leak Marking Scheme for Construction Quality Testing of Geomembrane liners in Landfills*. International Journal of Environmental Resources Volume 8(2): 447-452.

- Goswami, D. Dan Choudhury, B.N. 2013. *Chemical Characteristic of Leachate Contaminated Lateritic Soil*. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology Volume 2(4): 999-1005.
- Hambali, E., Suryani, A., Dadang, Hariyadi, Hanafie, H., Reksowardojo, I.K., Rivai, M., Ihsanur, M., Suryadarma, P., Tjitrosemito, S., Prawitasari, T., Prakoso, T., dan Purnama, W. 2006. *Jarak Pagar: Tanaman Penghasil Biodiesel*, <URL:<https://books.google.co.id/books?id=w2qZ9uLFrw0C>>
- Hariyanto, S., Citrasari, N., dan Soedarti, T. 2014. *Karakterisasi Lindi Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Sampah sebagai Data Rancangan Teknologi Pengolahan Limbah Cair*. Lembaga Penelitian Univeristas Airlangga.
- Hasanah, M.U., Ardhi, N.D., Iriyanti, M., dan Ferani, S. 2015. *Analisis Geokimia dan Metode Geolistrik Resistivitas 2D untuk Mengetahui Aliran Lindi di TPA Babakan Ciparay*. Chimica et Natura Acta Volume 3(1): 6-10.
- Hazelton, Pam dan Murphy, Brian. 2007. *Interpreting Soil Test Results: What Do All the Numbers Mean?*, <URL: <https://books.google.co.id/books?id=0vqh73Eyi50C>>
- HelloMojo. 2007. *Eucalyptus scoparia*, <URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eucalyptus_scoparia.jpg>
- Horchani, F., Hajri, R., dan Aschi-Smiti, S. 2010. *Effect of Ammonium or Nitrate Nutrition on Photosynthesis, Growth, and Nitrogen Assimilation in Tomato Plants*. Journal of Plant Nutrition and Soil Science Volume 173(4): 610-617.
- Huang, J.W., Blaylock, M.J., Kapulnik, Y., dan Ensley, B.D. 1998. *Phytoremediation of Uranium-Contaminated Soils: Role of Organic Acids in Triggering Uranium Hyperaccumulation in Plants*. Environmental Science Technology Volume 31: 2004-2008.
- Hung, Chiu-Yueh, Holliday, Bronwyn M., Kaur, H., Yadav, R., Kittur, F.S., dan Xie, J. 2012. *Identification and*

- Characterization of Selenate- and Selenite-responsive Genes in a Se-hyperaccumulator Astragalus racemosus*. Molecular Biology Reports 39(7): 7635-7646.
- Hylander, Lars Daniel. 2002. *Improvements of Rhizoboxes used for Studies of Soil-Root Interactions*. Journal of Communications in Soil Science and Plant Analysis Volume 33(1-2): 155-161.
- Irawan, K.S., Sururi, M.R., dan Ainun, S. 2015. *Konsentrasi Sisa Ozon pada Pengolahan Lindi TPA Paripurna menggunakan Advanced Oxidation Process (AOP)*. Jurnal Rekayasa Lingkungan Volume 3(2).
- Janngam, J., Anurakpongsatorn, P., Satapanajaru, T., dan Techapinyawat, S. 2010. *Phytoremediation: Vetiver Grass in Remediation of Soil Contaminated with Trichloroethylene*. Science Journal Ubon Ratchathani University Volume 1(2): 52-57.
- Juhaeti, T., Syarif, F., Hidayati, N. 2004. *Inventarisasi Tumbuhan potensial untuk Fitoremediasi Lahan dan Air Terdegradasi Penambangan Emas*. Jurnal Biodiversitas Volume 6(1): 31-33.
- Kanmani, S. dan Gandhimathi, R. 2013. *Assessment of Heavy Metal Contamination in Soil Due to Leachate Migration from an Open Dumping Site*. Applied Water Science Volume 3(1): 193-205.
- Khan, S., Afzal, M., Iqbal, S., dan Khan, Q.M. 2013. *Plant-Bacteria Partnerships for the Remediation of Hydrocarbon Contaminated Soils*. Chemosphere Volume 90(4): 1317-1332.
- Kjeldsen, P., Barlaz, M.A., Rooker, A.P., Baun, A., Ledin, A., dan Christensen T.H. 2002. *Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate: A Review*. Critical Reviews in Science and Technology Volume 32(4): 297-336.
- Leghari, S.J., Wahocho, N.A., Laghari, G.M., HafeezLaghari, A., MustafaBhabhan,G., HussainTalpur, K., Bhutto, T.A.,

- Wahocho, S.A., dan Lashari, A.A. 2016. *Role of Nitrogen for Plant Growth and Development: A Review*. Advances in Environmental Biology Volume 10(9): 209-218.
- Leguizamo, M.A.O., Gomez, W.D.F., dan Sarmiento, M.C.G. 2017. *Native Herbaceous Plant Species with Potential Use in Phytoremediation of Heavy Metals, Spotlight on Wetland – A Review*. Journal of Chemosphere Volume 168: 1230-1247.
- Li, Y., Liang, F., Zhu, Y., dan Wang, F. 2013. *Phytoremediation of a PCB-contaminated Soil by Alfalfa and Tall Fescue Single and Mixed Cultivation*. Journal of Soils Sediments Volume 13(5): 925-931.
- Liong, S., Noor, A., Taba, P., dan Zubair, H. 2009. *Dinamika Akumulasi Kadmium pada Tanaman Kangkung Darat (Ipomoea reptans Poir)*. Indonesia Chimica Acta Volume 2(1).
- Lotfy, S.M. dan Mostafa, A.Z. 2014. *Phytoremediation of Contaminated Soil with Cobalt and Chromium*. Journal of Geochemical Exploration Volume 144(B): 37-373.
- Luo, J., Qi, S., Peng, L., dan Xie, X. 2015. *Phytoremediation Potential of Cadmium-Contaminated Soil by Eucalyptus globulus Under Different Coppice Systems*. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology Volume 94(2): 321-325.
- Malik, R.N., Husain, S.Z., dan Nazir, I. 2010. *Heavy Metal Contamination and Accumulation in Soil and Wild Plant Species from Industrial Area of Islamabad, Pakistan*. Pakistan Journal of Botany Volume 42(1): 291-301.
- Mangkoedihardjo, Sarwoko dan Samudro, Ganjar. 2010. *Fitoteknologi Terapan*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Mansur, Irdika. 2015. *Bisnis dan Budidaya 18 Kayu Komersial*. Jakarta: Penerbit Swadaya. <URL: https://books.google.co.id/books/about/Bisnis_Budidaya_18_Kayu_Komersial.html?id=zL3KCgAAQBAJ&redir_esc=y>

- Marrugo-Negrete, J., Durango-Hernandez, J., Pinedo-Hernandez, J., Olivero-Verbel, J., dan Diez, S. 2015. *Phytoremediation of Mercury-contaminated Soils by Jatropha curcas*. *Chemosphere* Volume 127: 58-63.
- Martin, R. dan Chanthy, P. 2009. *Weeds of Upland Crops in Cambodia*, <URL: <http://aciagov.au/publication/mn141>>
- McIntyre, Terry. 2003. *Phytoremediation of Heavy Metals from Soils* in Tsao, D.T. (eds). *Phytoremediation*. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology* Volume 78. Heidelberg, Berlin: Springer.
- Mendez, Monica O. dan Maier, Raina M. 2008. *Phytostabilization of Mine Tailings in Arid and Semiarid Environments-An Emerging Remediation Technology*. *Environmental Health Perspectives* Volume 116(3): 278-283.
- Meggo, R.E. dan Schnoor, J.L. 2013. *Cleaning Polychlorinated Biphenyl (PCB) Contaminated Garden Soil by Phytoremediation*. *Environmental Science* Volume 1(1): 33-52.
- Muliadi, Liestianty, D., Yanny, Sumarna, S. 2013. *Fitoremediasi: Akumulasi dan Distribusi Logam Berat Nikel, Cadmium dan Chromium dalam Tanaman Ipomea reptana*. Prosiding Seminar Nasional Kimia dan Pendidikan Kimia HKI Sumatera Barat. Sumatera Barat: 7 Desember 2013.
- Nagendran, R., Selvam, A., Joseph, K., dan Chiemchaisri, C. 2006. *Phytoremediation and Rehabilitation of Municipal Solid Waste Landfills and Dumpsites: A Brief Review*. *Journal of Waste Management* Volume 26(12): 1357-1369.
- Nazir, A., Malik, R.N., Ajaib, M., Khan, N., dan Siddiqui, M.F. 2011. *Hyperaccumulators of Heavy Metals of Industrial Areas of Islamabad and Rawalpindi*. *Pakistan Journal of Botany* Volume 43(4): 1925-1933.
- Nisa, W.U. dan Rashid, A. 2015. *Potential of Vetiver (Vetiveria zizanioides L.) Grass in Removing Selected PAHs from Diesel Contaminated Soil*. *Pakistan Journal of Botanical* Volume 47(1): 291-296.

- Oktiawan, W. dan Priambada, I.B. 2008. *Pola Penyebaran Limpasan Logam Lindi TPA Jatibarang pada Air Sungai Kreo*. Jurnal Presipitasi Volume 4(1): 56-61.
- Oshunsanya, Suarau O. dan Aliku, OrevuOghene. 2017. *Vetiver Grass: A Tool for Sustainable Agriculture* in Almusaed, Amjad (Ed.). *Grasses – Benefits, Diversities and Functional Roles*. InTech.
- Pajević, S., Borišev, M., Nikolić, N., Arsenov, D.D., Orlović, S., dan Župunski, M. 2016. *Phytoextraction of Heavy Metals by Fast-Growing Trees: A Review* in Ansari, A.A., Gill, S.S., Gill, R., Lanza, G.R., Newman, L. (Eds.). *Phytoremediation Management of Environmental Contaminants* Volume 3. Cham, Switzerland: Springer.
- Pan, S., Cao, S., Yang, L., dan He, M. 2014. *Enhanced Dissipation of PAHs in Soils by Combined Plants Cultivation*. Advanced Materials Research Volume 838-841 Chapter 19: 2497-2502.
- Pandey, V.C., Singh, K., Singh, J.S., Kumar, A., Singh, B., dan Singh, R.P. 2012. *Jatropha curcas: A Potential Biofuel Plant for Sustainable Environmental Development*. Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 16(5): 2870-2883.
- Patandungan, A., H.S., Syamsidar, dan Aisyah. 2016. *Fitoremediasi Tanaman Akar Wangi (Vetiver zizanioides) terhadap Tanah Tercemar Logam Kadmium (Cd) pada Lahan TPA Tamangapa Antang Makassar*. Al-Kimia Volume 4(2): 8-21.
- Patterson, Susan. 2016. *Fixing Magnesium Deficiency in Plants: How Magnesium Affects Plant Growth*, <URL: <https://www.gardeningknowhow.com/garden-how-to/soil-fertilizers/fixing-magnesium-deficiency.htm>>
- Peralta-Videa, J.R., Gardea-Torresdey, J.L., Gomez, E., Tiemann, K.J., Parsons, J.G., Rosa, G. de la, dan Carrillo, G. 2002. *Potential of Alfalfa Plant to Phytoremediate Individually Contaminated Montmorillonite-Soils with*

Cadmium(II), Chromium(VI), Copper (II), Nickel(II), and Zinc(II). Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology Volume 69(1): 74-81.

Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 59 tahun 2016 tentang Baku Mutu Lindi bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah.

Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 3 tahun 2013 tentang Penyelenggaraan Prasarana dan Sarana Persampahan dalam Penanganan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga.

Phillips, C.J., Marden, M., dan Suzanne, L.M. 2014. *Observations of Root Growth of Young Poplar and Willow Planting Types*. New Zealand Journal of Forestry Science Volume 44(15).

Pillai, S., Peter, A.E., M., Sunil B., dan S., Shrihari. 2014. *Soil Pollution near a Municipal Solid Waste Disposal Site in India*. International Conference on Biological, Civil and Environmental Engineering (BCEE-2014). Dubai: 17-18 Maret 2014.

Pilon-Smits, Elizabeth. 2005. *Phytoremediation*. Annual Review of Plant Biology Volume 56: 15-39.

Pilon-Smits, E.A.H. dan Freeman, J.L. 2006. *Environmental Cleanup using Plants: Biotechnological Advances and Ecological Considerations*. Frontiers in Ecology and the Environment Volume 4(4): 203-210.

Pulford, I.D. dan Watson, C. 2003. *Phytoremediation of Heavy Metal-Contaminated Land by Trees – A Review*. Environment International Volume 29(4): 529-540.

Pivet, Bruce E. 2001. *Ground Water Issue: Phytoremediation of Contaminated Soil and Ground Water at Hazardous Waste Sites*. Washington DC: US EPA.

Pradhan, S.P., Conrad, J.R., Paterek, J.R., dan Srivastava, V.J. 1998. *Potential of Phytoremediation for Treatment of PAHs*

- in Soil at MGP Sites*. Journal of Soil Contamination Volume (4): 467-480.
- Prajapati, Kalavati dan Modi, H.A. 2012. *The Importance of Potassium in Plant Growth – A Review*. Indian Journal of Plant Sciences Volume 1(2-3): 177-186.
- Praveena, G.S. dan Rao, P.V.V.P. 2016. *Impact of Leachate on Soil Properties in the Dumpsite (A Case Study of Greater Visakhapatnam)*. International Journal of Engineering Research and General Science Volume 4(1): 235-241.
- Raghab, S.M., Meguid, Ahmed M. Abd El, dan Hegazi, H. A. 2013. *Treatment of Leachate from Municipal Solid Waste Landfill*. Housing and Building National Research Center Journal Volume 9(2): 187-192.
- Raisi, S.A.H.A., Sulaiman, H., Suliman, F.E., dan Abdallah, O. 2014. *Assessment of Heavy Metals in Leachate of an Unlined Landfill in the Sultanate of Oman*. International Journal of Environmental Science and Development Volume 5(1): 60-63.
- Rasooli, S., Yousefirad, M., dan Taghavi, L. 2015. *Selenium Phytoremediation Study of Contaminated Soils by Vetiveria zizanioides and Medicago sativa*. Environment Conservation Journal Volume 16(SE): 429-434.
- Rasse, D.P., Smucker, A.J.M., dan Santos, D. 1998. *Alfalfa Root and Shoot Mulching Effects on Soil Hydraulic Properties and Aggregation*. Soil Science Society of America Journal Volume 64(2): 725-731.
- Razaq, M., Zhang, P., Shen, H., dan Salahuddin. 2017. *Influence of Nitrogen and Phosphorus on the Growth and Root Morphology of Acer mono*. PLoS ONE Volume 12(2): e0171321.
- Rezagama, A., Hadiwidodo, M., Purwono, P., Ramadhani, N.F., dan Yustika, M. 2016. *Penyisihan Limbah Organik Air Lindi TPA Jatibarang menggunakan Koagulasi-Flokulasi Kimia*. Teknik Volume 37(2): 78-83.

- Rhoades, Heather. 2017. *The Importance of Phosphorus in Plant Growth*, <URL: <https://www.gardeningknowhow.com/garden-how-to/soil-fertilizers/phosphorus-plant-growth.htm>>
- Rockwood, Patricia. 2008. *How Far Do Poplar Roots Spread?*, <URL: <http://homeguides.sfgate.com/far-poplar-roots-spread-64293.html>>
- Roongtanakiat, Nualchavee. 2009. *Vetiver Phytoremediation for Heavy Metal Decontamination*. Technichiwoal Bulletin No. 2009/1 Pacific Rim Vetiver Network.
- Saeed, I.A.M. dan El-Nadi, A.H. 1997. *Irrigation Effects on the Growth, Yield, and Water Use Efficiency of Alfalfa*. Irrigation Science Volume 17(2): 63-68.
- Schueler, A.S. dan Mahler, C.F. 2007. *Soil Contamination Caused by Urban Solid Waste Leachate*. Proceeding Sardinia 2007, Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium S. Margherita. Italia: 1-5 Oktober 2007.
- Siegmund, Walter. 2006. *Populus trichocarpa 05897*, <URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Populus_trichocarpa_05897.JPG>
- Sinaga, Sardo. 2017. *Uji Infeksi Phaeophleospora sp. Pada Klon Hibrid Eucalyptus Grandis X Eucalyptus Urophylla di PT. Toba Pulp Lestari, Tbk Kabupaten Toba Samosir, Sumatera Utara*. Skripsi. Universitas Sumatera Utara.
- Somtrakoon, K. dan Kruatrachue, M., dan Huang, Lee. 2014. *Phytoremediation of Endosulfan Sulfate-Contaminated Soil by Single and Mixed Plant Cultivations*. Journal of Water, Air, & Soil Pollution Volume 225(3): 1-13.
- Sundaramoorthy, P., Chidambaram, A., Ganesh, K.S., Unnikannan, P., dan Baskaran, L. 2010. *Chromium Stress in Paddy: (i) Nutrient Status of Paddy under Chromium Stress; (ii) Phytoremediation of Chromium by Aquatic and Terrestrial Weeds*. Comptes Rendus Biologies Volume 333(8): 597-607.

- Tjahjana, Bambang Eka dan Pranowo, Dibyo. 2010. *Budidaya dan Pengolahan Hasil Rimer Jarak Pagar*, <URL: http://www.academia.edu/4178742/Budidaya_dan_Pengolahan_Jarak_Pagar_Jatropha_curcas_L._Cultivation_and_Processing_the_Jatropha>
- Tripathi, D.K., Singh, V.P., Ahmad, P., Chauhan, D.K., Prasad, S.M. 2016. *Silicon in Plants: Advances and Future Prospects*. United States of America: CRC Press. <URL: https://books.google.co.id/books/about/Silicon_in_Plants.html?id=aXeuDQAAQBAJ&redir_esc=y>
- Ulfah, M. dan Dewi, E.R.S. 2015. *Evaluasi Fitoremediasi Pencemaran Logam Berat di Tanah TPA*. Seminar Nasional Hasil Penelitian (SNHP-V) Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas PGRI Semarang. Semarang: 21 November 2015.
- Usman, Sarip dan Santosa, Imam. 2014. *Pengolahan Air Limbah Sampah (Lindi) dari Tempat Pembuangan Akhir Sampah (TPA) menggunakan Metoda Constructed Wetland*. Jurnal Kesehatan Volume V(2): 98-108.
- Vaněk T., Podlipna R., dan Soudek P. 2010. *General Factors Influencing Application of Phytotechnology Techniques* in Kulakow, P.A. dan Pidlisnyuk, V.V. (eds.). *Application of Phytotechnologies for Cleanup of Industrial, Agricultural, and Wastewater Contamination*. Dordrecht: Springer.
- Vangronveld, J., Herig, R., Weyens, N., Boulet, J., Adriaensen, K., Ruttens, A., Thewys, T., Vassilev, A., Meers, E., Nehnevajova, E., Lelie, D. van der, dan Mench, M. 2009. *Phytoremediation of Contaminated Soils and Groundwater: Lessons from the Field*. Journal of Environmental Science Pollution Resources Volume 16(7): 765-794.
- Vervaeke, P., Luyssaert, S., Mertens, J., Meers, E., Tack, F.M.G., dan Lust, N. 2003. *Phytoremediation Prospects of Willow Stands on Contaminated Sediment: A Field Trial*. Environmental Pollution Volume 126(2): 275-282.

- Vishnoi, S.R. dan Srivastava, P.N. 2008. *Phytoremediation – Green for Environmental Clean*. Proceedings of Taal2007: The 12th World Lake Conference: 1016-1021.
- Wang, K., Huang, H., Zhu, Z., Li, T., He, Z., Yang, X., dan Alva, A. 2013. *Phytoextraction of Metals and Rhizoremediation of PAHs in Co-Contaminated Soil by Co-Planting of Sedum Alfredii with Ryegrass (Lolium perenne) or Castor (Ricinus Communis)*. International Journal of Phytoremediation Volume 15(3): 283-298.
- Wei, L., Zhou, Q., dan Hua, T. 2010. *Removal of Organic Matter from Landfill Leachate by Advanced Oxidation Processes: A Review*. International Journal of Chemical Engineering Volume 2010
- Wei, S. dan Pan, S. 2010. *Phytoremediation for Soil Contaminated by Phenanthrene and Pyrene with Multiple Plant Species*. Journal of Soil Sediments Volume 10(5): 886-894.
- Wenzel, W.W., Wieshammer, G., Fitz, W., dan Puschenreiter, M. 2001. *Novel Rhizobox Design to Assess Rhizosphere Characteristics at High Spatial Resolution*. Journal of Plant and Soil Volume 237(1): 37-45.
- Widdowson, M.A., Shearer, S., Andersen, R.G., dan Novak, J.T. 2005. *Remediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Compounds in Groundwater using Poplar Trees*. Environment Science and Technology Volume 39(6): 1598-1605.
- Wuana, R.A. dan Okieimen, F.E. 2011. *Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation*. International Scholarly Research Network (ISRN) Ecology Volume 2011.
- Wulandari, R.S., Khumaedi, dan Yulianti, D. 2015. *Identifikasi Pertambahan Persebaran Limbah Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Jatibarang Tahun 2015 menggunakan Metode Geolistrik*. Jurnal MIPA Volume 38(2): 127-137.

- Yadav, S.K., Juwarkar, A.A., Kumar, G.P., Thawale, P.R., Singh, S.K., dan Chakrabarti, T. 2009. *Bioaccumulation and Phyto-translocation of Arsenic, Chromium and Zinc by Jatropha curcas L.: Impact of Dairy Sludge and Biofertilizer*. Bioresource Technology Volume 100(20): 4616-4622.
- Yao, B., Cao, J., Zhao C., dan Rengel, Z. 2011. *Influence of Ammonium and Nitrate Supply on Growth, Nitrate Reductase Activity and N-use Efficiency in a Natural Hybrid Pine and Its Parents*. Journal of Plant Ecology Volume 4(1): 275-282.
- Yiping, X., Yiqi, Z., Donghong, W., Shaohua, C., Junxin, L., dan Zijian, W. 2008. *Occurrence and Removal of Organic Micropollutants in the Treatment of Landfill Leachate by Combine Anaerobic-Membrane Bioreactor Technology*. Journal of Environmental Science Volume 20(11): 1281-1287.
- Zhan, T.L.T., Guan, C., Xie, H.J., dan Chen, Y.M. 2014. *Vertical Migration of Leachate Pollutants in Clayey Soil Beneath an Uncontrolled Landfill at Huainan, China: A Field and Theoretical Investigation*. Science of the Total Environment Volume 470-471: 290-298.
- Zhin-xin, N., Li-na, S., Tie-heng, S., Yu-shuang, L., dan Hong, W. 2007. *Evaluation of Phytoextraction Cadmium and Lead by Sunflower, Ricinus, Alfalfa and Mustard in Hydroponic Culture*. Journal of Environmental Science Volume 19: 961-967.

BIOGRAFI PENULIS



Penulis merupakan putri kelahiran Sangatta pada tanggal 10 September 1997. Penulis mengenyam pendidikan dasar pada tahun 2004-2009 di SD YPPSB 2, Sangatta. Kemudian dilanjutkan ke SMPN 1 Sangatta Utara pada tahun 2009-2011 dan SMAN 1 Balikpapan pada tahun 2011-2013. Penulis diterima sebagai mahasiswa S1 Teknik Lingkungan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2013.

Selama perkuliahan, penulis aktif sebagai pengurus di HMTL, panitia ENVIRONATION, dan asisten laboratorium. Penulis terpilih sebagai ambasadior di Tunza Eco-generation pada periode ke 16 dan 17. Selain itu, penulis juga terpilih sebagai fasilitator dalam acara 2017 *Junior Eco Engineering Academy* di Seoul, Korea Selatan. Penulis dapat dihubungi melalui email dewi_retno56@yahoo.com.